

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



A detecção e correcção do nível de Descargas Parciais em Aparelhagem Eléctrica de Média Tensão

Nuno Miguel Del Valle Moreira Matos

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor António Machado e Moura

Coorientador: Engenheiro Luís Tovar

16 de Julho de 2016

Resumo

A grande e contínua evolução tecnológica promove o uso de todo o tipo de tecnologia, sendo que esta está presente no nosso dia-a-dia desde os objetos mais básicos até aos mais complexos instrumentos fundamentais para diversas profissões. O aumento do consumo de energia elétrica como consequência desta evolução tecnológica obriga a garantir a máxima continuidade de serviço do sistema elétrico de energia, tornando-se essencial garantir uma proteção eficiente do mesmo.

Sendo impossível obter uma rede perfeita, torna-se fundamental que se cumpram certos níveis de qualidade e de continuidade de serviço. Como tal, torna-se necessário que haja um investimento nas redes de transporte e de distribuição. Neste contexto, a Efacec apresenta um portefólio alargado de soluções tanto ao nível da distribuição primária como ao nível da distribuição secundária. No âmbito desta Dissertação será objeto de estudo uma solução compacta e modular, denominada Fluofix GC e o estudo incidirá sobre os aspetos construtivos e a constituição dos seus porta-fusíveis.

O principal objetivo deste estudo passa por atingir a performance dielétrica máxima tanto ao nível do choque como da rigidez dielétrica e será dado um enfoque maior na temática das DPs, nomeadamente no componente mais crítico em resina epóxi, o porta fusível. A intenção passa por realizar simulações de cálculo de campos elétricos no tubo porta fusível para diferentes morfologias tanto ao nível da espessura do material de isolamento do tubo porta fusível como do formato dos materiais condutores situados no interior.

Abstract

The large and continuous technological evolution promotes the usage of all types of technology which is present in our day-to-day objects from the most basic to the most complex key tools for different professions. The increase in electricity consumption as a result of this technological evolution requires the maximum service continuity possible to the electric power system, making it essential to ensure effective protection of the system.

Knowing that it is impossible to reach a perfect network, it becomes crucial to fulfill certain levels of quality and service continuity. As a result, it is necessary to have an investment in transmission and distribution networks. In this context, Efacaec has an extended portfolio of solutions both in primary and secondary distribution. In this Master's Thesis Dissertation a compact and modular solution will be studied, the Fluofix GC and this study will focus on the constructive aspects of its fuse tube holder.

The main goal of this study is to achieve maximum dielectric performance when it concerns to mechanical and dielectrical strenght and it will be a big focus on partial discharges thematic, particularly in the most critical component of epoxy resin, the fuse tube holder. The idea involves performing electric field calculation, through simulations, on the fuse holder tube to different morphologies at both the thickness of the fuse holder tube and the insulating material of conductive material format which located inside the tube.

Agradecimentos

Ao longo do período de realização da presente Dissertação dediquei muito de mim para conseguir finalizar esta etapa tão importante da minha vida. Nem sempre foi fácil, houve períodos frustrantes e em que a esperança se desvanecia. Ao mesmo tempo houve períodos de muita aprendizagem, de esforço e de trabalho. É então com um profundo agradecimento que aqui escrevo a todas as pessoas que me apoiaram ao longo deste percurso.

Ao Professor Doutor António Machado e Moura, por toda a amizade demonstrada ao longo deste percurso, por toda ajuda que dentro das suas possibilidades me proporcionou e por todas as palavras de incentivo que sempre teve para comigo.

À EFACEC-Energia, Máquinas, Equipamentos Elétricos, S.A., pela oportunidade que me foi proporcionada de trabalhar num projeto num contexto empresarial.

Ao Eng. Luís Tovar por toda a paciência e compreensão demonstrada, por todos os ensinamentos transmitidos e por, apesar de todos os seus compromissos, conseguir sempre disponibilizar um pouco do seu tempo para me receber. Ao projetista da Efacec Rui Marinho por toda a simpatia e disponibilidade demonstrada e pela ajuda crucial que me deu a certa altura deste período e que acabou por ser fundamental para o desenvolvimento da presente Dissertação.

Aos meus pais e a toda a minha família que sempre me proporcionaram tudo o que necessito e que me apoiaram em todos os momentos difíceis que passei ao longo do meu percurso académico. Um agradecimento especial ao meu avô Joaquim que foi um dos grandes impulsionadores da minha vida académica e que hoje estaria muito orgulhoso em ver-me terminar esta etapa tão importante da minha vida. Onde quer que estejas um grande obrigado carregado de saudade.

À minha namorada Rita, por todo o apoio, força e carinho que sempre me deu e por me ter aturado nos dias menos bons que tive durante este período. Sem dúvida, foi e desejo que continue a ser um pilar fundamental na minha vida e que em muito também contribuiu para o realizar deste objetivo.

Por fim mas não menos importante, aos meus amigos que sempre me acompanharam ao longo da minha vida. Aos que tive o prazer de conhecer ao longo deste percurso académico e aos que já faziam parte da minha vida agradeço-vos por todos os bons momentos que passamos juntos porque sem amigos a vida também não faria sentido e de alguma forma todos me ajudaram a cumprir o meu objetivo.

A todos vocês o meu sincero obrigado!

Nuno Matos

*“I’ve failed over and over and over again in my life
and that is why I succeed.”*

Michael Jordan

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Motivação e objetivos	2
1.3	Estrutura da Dissertação	3
2	Aparelhagem Elétrica	5
2.1	Equipamentos de Manobra	5
2.1.1	Disjuntores	6
2.1.2	Interruptores	10
2.1.3	Seccionadores	11
2.1.4	Fusíveis	11
2.2	Perspetiva Histórica da Aparelhagem de Média Tensão	11
2.2.1	O Estado Atual	12
2.2.2	O Futuro	13
2.3	Resumo	15
3	O fenómeno das Descargas Parciais	17
3.1	O que são Descargas Parciais?	17
3.2	Tipos de descargas parciais	18
3.2.1	Descargas parciais internas	18
3.2.2	Descargas parciais superficiais	19
3.2.3	Descargas parciais externas	19
3.3	Influência das descargas parciais nos dielétricos	19
3.3.1	Materiais de isolamento gasosos	21
3.3.2	Materiais de isolamento líquidos	21
3.3.3	Materiais de isolamento sólidos	21
3.3.4	Materiais de composição mista	22
3.4	Métodos de deteção	23
3.4.1	Métodos não elétricos	23
3.4.2	Métodos Elétricos	24
3.4.3	Medição de descargas parciais	26
3.5	Resumo	26
4	Caso de Estudo	29
4.1	O que é o FLUOFIX GC?	29
4.2	Características construtivas	29
4.2.1	Manobra dos comandos	30
4.2.2	Disjuntores DIVAC	31

4.2.3	Tubos porta-fusíveis	32
4.3	Características técnicas gerais	33
4.4	Unidades modulares	33
4.4.1	Unidade IS	34
4.4.2	Unidade CIS	34
4.4.3	Unidade DC	35
4.4.4	Unidade SB	35
4.5	Unidades compactas	36
4.6	Presença de tensão e concordância de fases	36
4.7	Ligação do circuito à terra	36
4.8	Resumo	37
5	Metodologia	39
5.1	Tipo de Estudo	39
5.2	Análise de Elementos Finitos	39
5.2.1	Construção da biblioteca de materiais	40
5.2.2	Importação da geometria	41
5.2.3	Geração da malha do modelo	41
5.2.4	Definição das condições do modelo	42
5.2.5	Escolha do tipo de solução e tratamento de resultados	43
5.2.6	Comparação de resultados com valores de rigidez dielétrica	43
5.3	Cenários a simular	44
5.3.1	Cenário 1	44
5.3.2	Cenário 2	44
5.3.3	Cenário 3	45
5.3.4	Cenário 4	45
5.3.5	Cenário 5	46
5.4	Resumo	47
6	Resultados e Discussão	49
6.1	Cenário 1	50
6.2	Cenário 2	51
6.3	Cenário 3	53
6.4	Cenário 4	54
6.5	Cenário 5	56
7	Conclusões e Trabalho Futuro	59
7.1	Principais conclusões	59
7.2	Satisfação dos Objectivos e Principais dificuldades encontradas	60
7.3	Trabalhos Futuros	61
7.3.1	Determinação com precisão de valores de resistividade elétrica dos materiais	61
7.3.2	Estudo de morfologias adicionais para o modelo do tubo porta fusível	61
7.3.3	Implementação de ensaios de Descargas Parciais	61
	Referências	63

Lista de Figuras

2.1	Detalhes construtivos de um disjuntor com isolamento a ar [1]	7
2.2	Representação da explosão axial [1]	8
2.3	Detalhes construtivos de um disjuntor com isolamento a vácuo [1]	9
2.4	Comparação da rigidez dielétrica para três meios de extinção distintos [2]	10
2.5	Tendência de mercado até ao ano 2000 ao nível da aparelhagem na MT [3]	12
2.6	Ilustração exemplificativa de um GIS utilizado na MT [3]	13
2.7	Diagrama com as três posições possíveis [4]	14
3.1	Representação de descargas parciais internas [5]	18
3.2	Representação de descarga parcial superficial [5]	19
3.3	Representação de descarga parcial externa [5]	20
3.4	Sensor TEV utilizado para deteção de emissão de ondas eletromagnéticas [6] . .	24
3.5	Sensor UHF que deteta ondas rádio [6]	24
3.6	Circuito tipicamente utilizado para deteção de descargas parciais [7]	25
4.1	Cela de Média Tensão FLUOFIX GC [8]	30
4.2	Três posições possíveis dos comandos dos interruptores-seccionadores [9]	31
4.3	Disjuntores DIVAC localizados dentro da cuba estanque	31
4.4	Tubo porta-fusível sem metalização	32
4.5	Tubo porta-fusível com metalização	32
4.6	Tampa colocada numa das extremidades do porta-fusível	33
4.7	Interior do tubo porta-fusível	33
4.8	Função Interruptor Seccionador [9]	34
4.9	Função Proteção Transformador [9]	35
4.10	Função Proteção de Cabos [9]	35
4.11	Função Seccionamento de Barras [9]	36
4.12	Exemplos de algumas configurações da cela FLUOFIX GC [9]	36
5.1	Organização de uma análise elétrica no <i>software Ansys</i>	40
5.2	Material apresentado por defeito quando se inicia uma análise elétrica no <i>Ansys</i> .	40
5.3	Visualização dos diferentes materiais do tubo porta fusível	42
5.4	Visualização dos terminais no interior do tubo	42
5.5	Aplicação da vareta e de ferramenta para ligar os terminais do interior do tubo porta fusível	44
5.6	Alteração introduzida no terminal frontal do tubo porta fusível	45
5.7	Alteração introduzida na resina do tubo porta fusível	46
5.8	Alteração introduzida no terminal frontal do tubo porta fusível	46
6.1	Corte do tubo segundo um plano no seu centro	49

6.2	Intensidade de campos elétricos no tubo porta fusível	50
6.3	Intensidade de campos elétricos nos topos do tubo porta fusível	51
6.4	Intensidade de campos elétricos no tubo porta fusível após inclusão das ferramentas de ensaio	52
6.5	Intensidade de campos elétricos nos topos do tubo porta fusível após inclusão das ferramentas de ensaio	52
6.6	Intensidade de campos elétricos no tubo porta fusível após introdução de alteração no terminal frontal	53
6.7	Intensidade de campos elétricos nos topos do tubo porta fusível após introdução de alteração no terminal frontal	54
6.8	Intensidade de campos elétricos no tubo porta fusível após aumento de espessura da camada de resina	55
6.9	Intensidade de campos elétricos nos topos do tubo porta fusível após aumento de espessura da camada de resina	55
6.10	Intensidade de campos elétricos no tubo porta fusível após eliminação de ondulações no terminal frontal	56
6.11	Intensidade de campos elétricos nos topos do tubo porta fusível após eliminação de ondulações no terminal frontal	57

Lista de Tabelas

4.1	Características técnicas da unidade FLUOFIX GC de 24 kV [10]	34
5.1	Lista de materiais e respetiva resistividade elétrica utilizados nas simulações do <i>Ansys</i>	41

Abreviaturas e Símbolos

BT	Baixa Tensão
DP	Descarga Parcial
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
GIS	Gas Insulated Switchgear
MAT	Muito Alta Tensão
MT	Média Tensão
RQS	Regulamento da Qualidade de Serviço
RMU	Ring Main Unit
SEE	Sistema Elétrico de Energia
SF_6	Hexafluoreto de Enxofre

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

A grande evolução tecnológica a que se tem assistido nas últimas décadas transformou a energia elétrica num bem precioso para garantir a qualidade de vida da nossa sociedade. A tecnologia está presente nas nossas vidas desde a mais pequena ferramenta do nosso dia-a-dia até aos mais complexos instrumentos fundamentais para diversas profissões. O aumento do consumo de energia elétrica como consequência desta evolução tecnológica obriga a garantir a máxima continuidade de serviço do sistema elétrico de energia (SEE), tornando-se essencial garantir uma proteção eficiente do mesmo.

Com o objetivo de controlar a qualidade e continuidade de serviço do SEE a Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE) estabeleceu alguns indicadores presentes no Regulamento da Qualidade de Serviço (RQS). O RQS é então um instrumento de regulação da qualidade do fornecimento de energia elétrica, no que respeita a: [11]

- Continuidade de Serviço – número e duração das interrupções de fornecimento;
- Qualidade da Energia Elétrica – amplitude, frequência, forma de onda e simetria do sistema trifásico de tensão;
- Qualidade Comercial – atendimento, informação, assistência e avaliação da satisfação dos clientes.

Numa rede ideal, tendo perfeita fiabilidade e nenhum requisito de manutenção ou reparação, não haveria necessidade de interromper os circuitos elétricos. No entanto, tal situação isso é impossível portanto o recurso à aparelhagem tem de ser considerado. Ainda assim, deve haver um certo cuidado de forma a não se instalar mais aparelhagem do que é absolutamente necessário e a aparelhagem que é instalada não deverá ter mais funcionalidades do que o necessário. [12]

Sendo impossível obter uma rede perfeita, torna-se fundamental que os indicadores apontados pela ERSE se cumpram de forma satisfatória. Para que tal aconteça, é necessário que os operadores das redes de transporte e de distribuição procedam a investimentos nas redes.

Neste âmbito, a EFACEC-Energia, Máquinas, Equipamentos Elétricos, S.A. apresenta um portefólio alargado de soluções tanto ao nível da Distribuição Primária como ao nível da Distribuição Secundária. Sendo esta empresa uma referência no sector da aparelhagem, é fundamental existir uma procura permanente da otimização do funcionamento da sua gama de soluções. No âmbito desta Dissertação será objeto de estudo uma solução compacta e modular, denominada FLUOFIX GC, cuja aplicação na Distribuição Secundária vai desde a produção de energia até à distribuição de energia elétrica. Este estudo incidirá sobre os aspetos construtivos e a constituição dos seus tubos porta fusíveis e sobre a ocorrência de Descargas Parciais (DPs) para níveis de tensão não desejáveis, tendo como objetivo melhorar o máximo possível a performance deste tipo de solução.

1.2 Motivação e objetivos

A elaboração da dissertação de mestrado representa o final de uma etapa marcante. A sua realização no seio de uma empresa de referência como a EFACEC e a possibilidade de conviver de perto com um ambiente profissional são fatores que contribuem para um elevado grau de motivação. Outro fator altamente motivador é a possibilidade de absorver conhecimento na área da aparelhagem, uma vertente que ao longo do curso é abordada em poucas unidades curriculares de forma aprofundada e que me permitirá ser um profissional mais completo.

O principal objetivo deste projeto passa por atingir a performance dielétrica máxima de acordo com a Norma IEC 62271-200 (*AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages 1 kV and up to and including 52 kV*) no equipamento de Distribuição Secundária de Média Tensão (MT), FLUOFIX GC, RMU isolado a SF_6 , de 24kV com 3 funções, 2IS+1CIS, tanto ao nível do choque como da rigidez dielétrica. Será dado um enfoque maior na temática das DPs, nomeadamente no componente mais crítico em resina epóxi, o porta fusível.

Como tal, será realizado em primeiro lugar um estudo aprofundado acerca da aparelhagem de MT, incidindo em primeiro lugar nos diversos tipos de equipamentos de manobra e dando depois uma perspetiva histórica do que tem sido até aos dias de hoje a aplicação deste tipo de aparelhagem. Em seguida, serão abordadas as DPs de forma detalhada com o intuito de promover o conhecimento nesta temática para posteriormente ter um melhor entendimento do trabalho a realizar e das soluções a encontrar para o problema. O passo seguinte será abordar o caso de estudo em questão, a cela FLUOFIX GC, de modo a conhecer tanto as suas características construtivas como técnicas e para compreender de forma clara o seu funcionamento. Posteriormente o objetivo será debruçar-me sobre o componente mais crítico da cela FLUOFIX ao nível da ocorrência de DPs, neste caso os tubos porta fusíveis. Como tal, será estudado o seu comportamento aquando da aplicação de tensão para diferentes cenários recorrendo a um *software* de cálculo de elementos finitos, mais especificamente através do *Workbench* do Ansys 17.0. Finalmente, serão apresentados os resultados das simulações dos diversos cenários testados e serão também retiradas algumas conclusões acerca dos resultados obtidos

1.3 Estrutura da Dissertação

Este documento encontra-se dividido em sete capítulos.

No presente capítulo, Capítulo 1, é feito um enquadramento geral do problema relativamente a um SEE. São ainda apresentados os objetivos e a motivação para a realização deste trabalho bem como a estrutura do documento onde são descritos os assuntos que cada capítulo aborda.

No capítulo 2, são apresentadas algumas das funções das celas de MT bem como a sua constituição geral. É ainda abordada a evolução das diversas tecnologias utilizadas neste tipo de celas, até ao cenário verificado atualmente e ainda é dada alguma atenção aos desafios que podem surgir num futuro próximo.

No capítulo 3 é abordado o fenómeno das DP's. Em primeiro lugar são expostos os tipos de DP's que ocorrem num dielétrico. É igualmente abordada a influência que as DP's têm nos dielétricos, sejam eles de materiais gasosos, líquidos ou sólidos. Ainda no mesmo capítulo são apresentados aspetos como as possíveis causas para a ocorrência de DP's num dielétrico ou ainda métodos de deteção e de medição dessas mesmas DP's.

O capítulo 4, foca-se numa cela em específico, o FLUOFIX GC. Ao longo deste capítulo é feita uma descrição aprofundada desta unidade de modo a conhecer a sua construção e o seu funcionamento de forma clara.

No capítulo 5 está exposta a metodologia seguida ao longo do trabalho. São apresentados os cenários analisados ao longo deste trabalho e são ainda descritas as alterações implementadas em cada cenário.

No capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos através das simulações no *Ansys* bem como alguns comentários relativos aos mesmos.

No capítulo final, o capítulo 7, são apresentadas as principais conclusões do trabalho realizado assim como as dificuldades encontradas ao longo deste percurso. São ainda feitas algumas sugestões para possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Aparelhagem Elétrica

A aparelhagem elétrica é um termo genérico onde se incluem todos os dispositivos de comutação associados principalmente com proteção elétrica. A aparelhagem elétrica inclui também todos os dispositivos associados ao controlo, medição e regulação do sistema de energia elétrica. [13]

Na procura de uma rede com a máxima proteção e segurança o recurso à aparelhagem é essencial. Quando ocorre uma falha no SEE, a parte afetada deverá ser isolada do restante sistema, estando assim este tipo de equipamentos diretamente ligado à fiabilidade do mesmo. Resumindo, a aparelhagem é necessária para: [14]

- Isolar equipamentos com falha
- Dividir grandes redes em secções para ações de reparação
- Reconfigurar redes de modo a restabelecer o fornecimento de energia
- Controlar outros equipamentos

2.1 Equipamentos de Manobra

Os equipamentos de manobra são dispositivos utilizados para fechar ou abrir circuitos elétricos e normalmente estão agrupados nas celas de MT. Existem diversos equipamentos de manobra utilizados pelos operadores das redes que se diferenciam pelos seus aspetos construtivos e pelas funções que desempenham. No âmbito deste trabalho são definidos quatro tipos de equipamentos:

- Disjuntores
- Interruptores
- Seccionadores
- Fusíveis

2.1.1 Disjuntores

Um disjuntor é um equipamento de manobra que pode ser operado manualmente ou automaticamente para o controlo e proteção do SEE, respetivamente. Uma vez que o SEE moderno lida com correntes muito elevadas, deve ser dada especial atenção durante a conceção do disjuntor para a interrupção segura do arco produzido durante a sua operação. [15]

Quando se dá a abertura dos contactos do disjuntor o circuito não é imediatamente interrompido visto que é originado um arco elétrico no disjuntor, estabelecido entre os seus contactos, que se dá pela ionização do meio envolvente. Enquanto este arco for mantido entre os contactos, a corrente que circula através do disjuntor não vai ser interrompida, isto porque o arco em si é um percurso condutor de eletricidade. Para a interrupção total da corrente do disjuntor é essencial extinguir o arco elétrico aí originado o mais rápido possível. [16]

Considerando o modo de extinção do arco, podem ser classificados diversos tipos de disjuntores:

- Disjuntores a Ar
- Disjuntores a Ar Comprimido
- Disjuntores a Óleo
- Disjuntores a Vácuo
- Disjuntores a SF_6

2.1.1.1 Disjuntores a Ar

Neste tipo de disjuntores a pressão atmosférica do ar é utilizada como meio de extinção do arco elétrico. O comprimento do arco é aumentado com recurso a corredores de arco que vão aumentar a sua resistência de tal forma que a queda de tensão ao longo do arco se torna superior à tensão de alimentação e o arco extingue-se. A figura 2.1 mostra os detalhes construtivos de um disjuntor com isolamento a ar e permite ver facilmente de que forma atuam os corredores de arco quando os contactos passam da posição de fechados para a posição de abertos. Para circuitos de alta indutância, se o arco não for extinto através dos corredores de arco, então é passado através de pratos divisores de arco onde este é refrigerado. Isso fará com que a desionização seja eficaz, removendo o calor do arco. Este tipo de disjuntores são geralmente empregues em aparelhagens industriais ou aparelhagens auxiliares em estações produtoras. [1]

2.1.1.2 Disjuntores a Ar Comprimido

Este tipo de disjuntores são mais adequados para altas tensões e utilizam o ar comprimido para extinguir o arco elétrico, sendo necessário recorrer a um sistema de ar comprimido auxiliar. Durante a operação de abertura dos contactos, é permitida a entrada do ar na câmara de extinção e afasta os contactos móveis. Os contactos são separados e a explosão do ar levará os gases ionizados

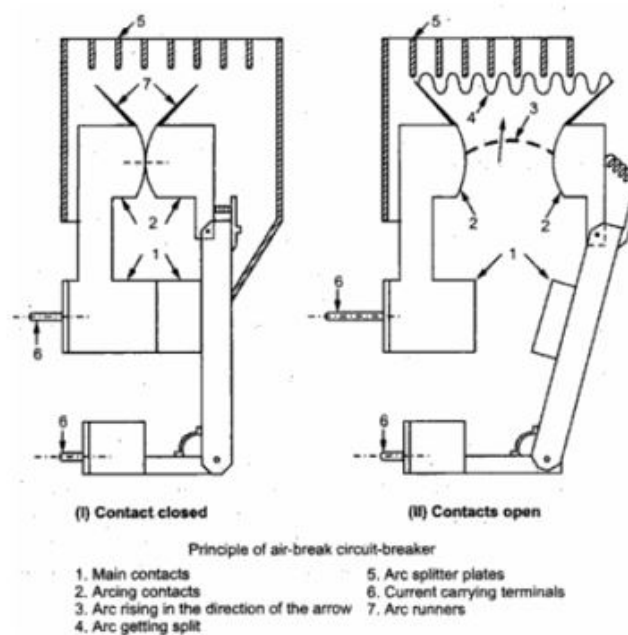


Figura 2.1: Detalhes construtivos de um disjuntor com isolamento a ar [1]

consigo para fora da câmara o que ajuda na extinção do arco. Para fechar os contactos, o ajuste da válvula permite que o ar da câmara passe para a atmosfera exterior. Isso faz com que a pressão da mola feche os contatos fixos e móveis. Existem dois principais tipos de explosão do ar: explosão cruzada e explosão axial, sendo este último de utilização mais frequente. Neste tipo de explosão o fluxo do ar dá-se ao longo da linha do arco, como mostra a figura 2.2. [1, 17]

Como todos os equipamentos, o disjuntor a ar comprimido apresenta vantagens e desvantagens. Algumas das suas principais vantagens são a grande velocidade da operação de extinção do arco, sendo que esta extinção não depende da corrente de arco, é não inflamável, quase não necessita de manutenção, permite facilmente uma alta velocidade de reengate e permite manter a estabilidade do sistema. No entanto, é essencial ter um compressor e equipamentos relacionados com capacidade suficiente, que acarretam custos de manutenção e não se torna económico para aplicações de Baixa Tensão (BT). Existe ainda a possibilidade de haver fugas nos tubos do sistema de ar comprimido. [1, 17]

2.1.1.3 Disjuntores a Óleo

Este é um dos tipos de disjuntor mais antigos, em que seus contactos são separados no óleo e as bolhas de gás formadas previnem o reacendimento do arco. O óleo mineral é conhecido por ter uma boa rigidez dielétrica e boas propriedades condutoras térmicas, sendo que o seu nível de isolamento está dependente do nível de impurezas. Este deve ser cuidadosamente seco e filtrado antes de ser utilizado e é essencial assegurar os níveis de óleo mais indicados para cada equipamento. [1, 2]

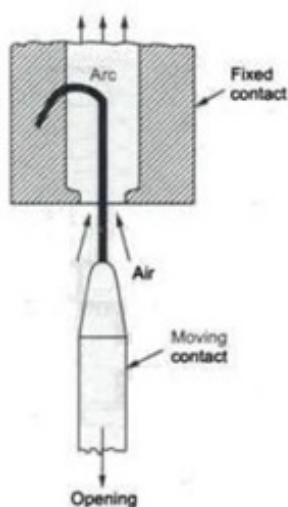


Figura 2.2: Representação da explosão axial [1]

Os disjuntores a óleo estão divididos em dois grupos: disjuntores que utilizam grandes quantidades de óleo e disjuntores que utilizam quantidades mínimas de óleo. Os primeiros são disjuntores de grandes dimensões e consistem num tanque ligado à terra contendo óleo até um certo nível e ar acima do nível do óleo estando ambos os contactos (fixos e móveis) imersos no óleo. Os segundos utilizam pequenos recipientes, apoiados em isoladores de porcelana, tendo apenas o óleo suficiente para a extinção do arco. Atualmente, estes disjuntores ainda estão disponíveis em níveis de distribuição baixos, onde os tempos de corte de correntes de curto-circuitos não são críticos para o sistema. Durante vários anos este tipo de disjuntores providenciaram desempenhos fiáveis, no entanto, atualmente em novas instalações os disjuntores a óleo podem ser considerados obsoletos devido ao trabalho de manutenção necessário para manter o óleo em bom estado. [1, 2]

2.1.1.4 Disjuntores a Vácuo

Quando os contactos do disjuntor se abrem no vácuo um arco elétrico é produzido devido à ionização de vapores metálicos e tal como o nome sugere, neste tipo de disjuntor, o vácuo é utilizado como o meio de extinção do arco elétrico. Este arco elétrico será rapidamente extinto já que os vapores metálicos anteriormente criados serão condensados ao fim de alguns microssegundos, o que levará a uma rápida recuperação da sua rigidez dielétrica e que é uma particularidade do disjuntor a vácuo. Resumindo, a extinção do arco neste tipo de disjuntor será altamente influenciada pelo material de que são constituídos os contactos, pela sua forma e pelas técnicas de condensação dos vapores metálicos. [1]

Quanto aos aspetos construtivos, os disjuntores a vácuo consistem numa câmara de vácuo na qual estão montados os contactos fixos e móveis (o contacto móvel está ligado a mecanismos de controlo) e ainda um escudo de arco. Será nestes escudos de arco que, durante o arco elétrico, os vapores metálicos libertados pela superfície dos contactos se vão condensar. A figura 2.3 mostra os detalhes construtivos de um disjuntor a vácuo. [1]

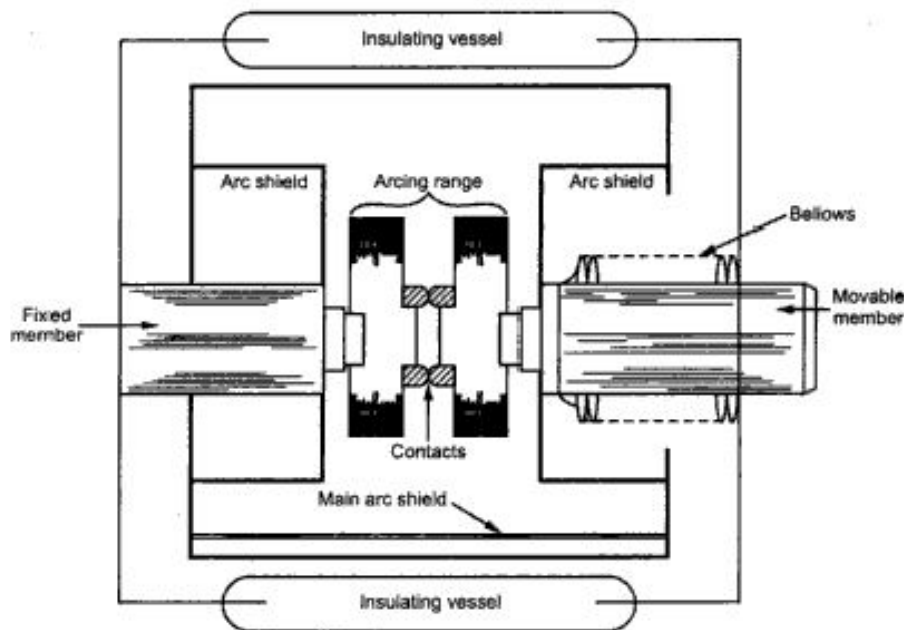


Figura 2.3: Detalhes construtivos de um disjuntor com isolamento a vácuo [1]

As principais vantagens da utilização de um disjuntor a vácuo são o completo isolamento do interruptor em relação à atmosfera, o pequeno risco de incêndio e o baixo nível de manutenção necessário. [2]

2.1.1.5 Disjuntores a SF_6

O gás SF_6 é conhecido por ser estável até cerca de 500 °C, inerte, não tóxico, inodoro e incolor. É um gás que possui excelentes capacidades isoladoras na gama de pressões entre 2 e 6 bar e tem uma capacidade dielétrica cerca de 3 vezes superior à do ar, considerando a mesma pressão. Na figura 2.4 pode verificar-se uma comparação entre a tensão de disrupção do dielétrico aquando do isolamento a gás SF_6 , ar e óleo. De notar que para pressões mais elevadas a rigidez dielétrica do gás aumenta ainda mais. Este facto representa uma grande vantagem pois para os mesmos níveis de tensão poderão ser implementados componentes de menor tamanho. [2, 18]

O gás SF_6 tem provado ser um meio de extinção muito bom. Para além da sua estabilidade e da sua rigidez dielétrica apresenta também uma boa condutividade térmica, uma boa capacidade de captar eletrões livres, necessita apenas de alguns microssegundos para arrefecer e os seus iões de enxofre e de flúor facilmente recombina para que se forme o gás estável SF_6 . Todas estas

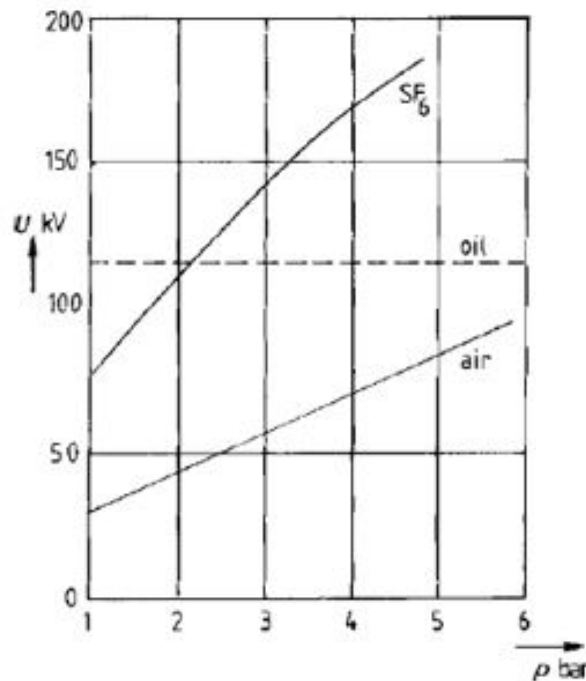


Figura 2.4: Comparação da rigidez dielétrica para três meios de extinção distintos [2]

propriedades contribuem para a retirada de energia do arco elétrico durante o processo de abertura do disjuntor. Para níveis de tensão abaixo dos 36 kV, os equipamentos que utilizam este gás como isolador, são usualmente considerados como “fechados para sempre”. Para níveis de tensão até cerca de 15 kV poderá ser utilizado o princípio de rotação do arco. Este princípio diz que em vez de se fazer a deslocação de gás frio (ar, SF_6 ou bolhas de gás de óleo) até ao arco, faz-se deslocar o arco por ação de um campo magnético produzido pela carga ou pela corrente de curto-circuito. Isto provocará um arrefecimento do arco e eventualmente a extinção do mesmo. [2, 18]

Este tipo de disjuntor apresenta diversas vantagens, entre as quais a pouca manutenção e o mínimo de equipamentos auxiliares necessários, a construção selada garante um isolamento completo e evita contaminações por mistura e tem a capacidade de interromper altas e baixas correntes de curto-circuito, magnetizantes e capacitivas sem recorrer a sobretensões excessivas e com uma curta duração do arco elétrico. No entanto, os disjuntores com isolamento a SF_6 também apresentam algumas desvantagens, tais como o seu elevado preço, a possibilidade de fugas de gás nas juntas do aparelho, o transporte do gás que é de custo elevado e o facto de o gás SF_6 quando exposto ao arco elétrico se tornar tóxico e não poder ser inalado. [1, 2]

2.1.2 Interruptores

Estes são dispositivos capazes de realizar a desconexão de toda a instalação elétrica, sem perigo para o operador que realiza esta ação. Em relação aos disjuntores apresenta algumas se-

melhanças, na medida em que ambos os dispositivos suportam e interromperem com facilidade a sua corrente nominal em segurança e ambos conseguem fechar em segurança os seus contactos em caso de falha e suportar essa falha por um determinado período de tempo nominal. No entanto a grande diferença baseia-se no facto de os disjuntores são capazes de detetar e interromper uma corrente de curto-circuito, sendo que o interruptor não consegue fazê-lo. [14]

2.1.3 Seccionadores

Os seccionadores são dispositivos mecânicos deverão ser capazes de suportar certos níveis de corrente nominal e de curto-circuito sendo capaz de, na sua posição de aberto, providenciar um determinado nível de isolamento entre os seus contactos. O propósito deste isolamento será cortar a alimentação de uma certa secção afetada por uma perturbação separando-a de qualquer fonte de energia elétrica por razões de segurança. Estes dispositivos podem estar acompanhados de fusíveis. [14]

2.1.4 Fusíveis

Os fusíveis são dispositivos de proteção contra sobreintensidades de corrente em circuitos. Estes devem ser capazes de suportar uma determinada corrente sem se deteriorarem e também de interromper uma determinada corrente de curto-circuito. A maioria dos equipamentos de manobra podem existir em combinações sendo comum encontrar soluções do género interruptor-fusível ou interruptor-seccionador por exemplo. [14]

2.2 Perspetiva Histórica da Aparelhagem de Média Tensão

Um interruptor de facas de quebra rápida foi o primeiro disjuntor reconhecido. No entanto, estes interruptores não tinham controlo sobre o arco tendo um operador de utilizar um machado isolado para interromper o arco. Mais tarde, interruptores mais eficientes foram desenvolvidos mergulhando as facas de quebra rápida num tanque de óleo isolante. A partir daí foram desenvolvidos disjuntores de óleo a granel (utilizado até aos anos 70) e disjuntores de mínimo óleo, que são aparelhos de menor volume. [3]

Em 1929 dá-se um passo bem-sucedido na direção dos disjuntores a ar, onde a separação dos contactos e a extinção do arco se deu no ar, à pressão atmosférica. No entanto, a chegada de aparelhagem moderna, aboliu virtualmente o uso destes disjuntores a ar em aplicações de MT na indústria. São então desenhados os disjuntores a ar comprimido, durante o período de 1935 até 1945, que eram mais populares na Muito Alta Tensão (MAT). Porém, não conseguiram conquistar o seu espaço na MT devido à sua complexidade, elevado preço e problemas de manutenção nos sistemas de ar comprimido. [3]

No ano de 1950 iniciou-se o trabalho de desenvolvimento de disjuntores utilizando o gás SF_6 sendo que os primeiros protótipos foram desenhados no início dos anos 60. As excelentes propriedades dielétricas deste gás ajudaram ao rápido desenvolvimento de disjuntores tanto para a MT

como para a MAT, assumindo esta tecnologia elevada importância especialmente na MAT. Ao nível da MT, os disjuntores a vácuo continuaram a ser utilizados juntamente com a tecnologia de SF_6 durante algum tempo. O aparecimento dos disjuntores a vácuo devido ao seu desenho simples e rugoso, exigência de baixo consumo de energia, grande número de operações de comutação e devido ao facto de ser amigo do ambiente na interrupção do arco fez com que ganhassem preponderância sobre todos os outros. Esta tecnologia praticamente eliminou todas as outras tecnologias na MT, exceto a aparelhagem com isolamento a SF_6 que ainda encontrou alguma utilização limitada. No entanto, a tecnologia de vácuo apresentava limitações ao nível do desenho de interruptores de AT o que acabou por restringir o seu uso à MT. [3]

Na figura 2.5 é possível acompanhar a tendência de mercado até ao ano 2000, ao nível da aparelhagem na MT.

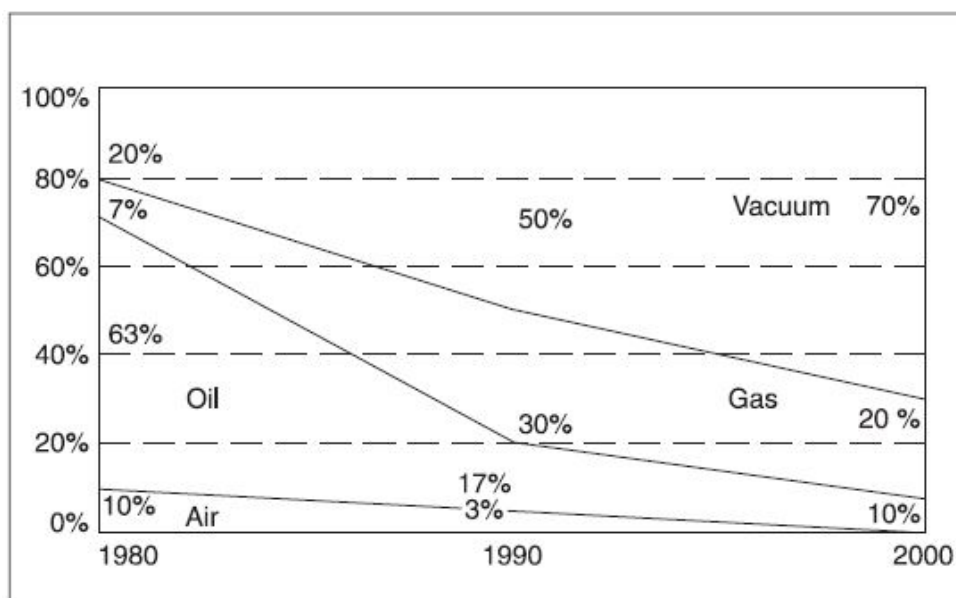


Figura 2.5: Tendência de mercado até ao ano 2000 ao nível da aparelhagem na MT [3]

2.2.1 O Estado Atual

Desenvolvimentos ao nível das tecnologias de disjuntores a vácuo e a SF_6 têm permitido a redução da quantidade de material utilizado, caminhando para a otimização do tamanho dos aparelhos. Ao mesmo tempo, a capacidade do interruptor foi reforçada de modo a lidar com níveis de falha maiores, que ocorrem devido à ligação de redes paralelas. Reduções das massas em movimento dos interruptores levaram ao uso de mecanismos mais simples e de mais baixa energia aumentando assim o seu tempo útil de vida.

Os GIS, que é um tipo de aparelhagem metálica compacta e encapsulada, estão a ter uma utilização cada vez maior por aplicações onde a fiabilidade é importante. Este conceito está a ganhar mais popularidade, por exemplo, em centros metropolitanos onde o espaço é sempre uma

restrição e tem de ser o mais bem utilizado possível. A figura 2.6 mostra um exemplo genérico de um GIS bem como alguns dos seus aspetos construtivos. [3]

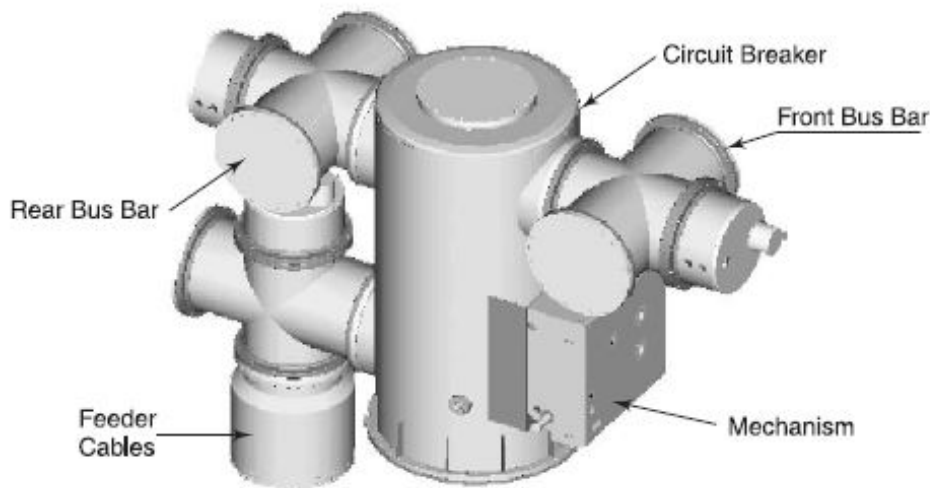


Figura 2.6: Ilustração exemplificativa de um GIS utilizado na MT [3]

2.2.1.1 O novo diagrama de três posições

O arranjo de três posições para aparelhos GIS RMU tem tido grande sucesso ao longo dos últimos 30 anos sendo ainda bastante apreciado. Hoje em dia existe uma tendência para utilizar disjuntores a vácuo em aplicações secundárias, sendo que para aplicações na distribuição secundária, simplicidade, insensibilidade e eficácia são sempre uma vantagem. Estes critérios foram o ponto de partida para um arranjo *all-in-one* para os GIS RMU. O novo arranjo que é proposto inclui a montante um interruptor de carga ou um disjuntor a vácuo e um seccionador de terra a jusante, proporcionando isolamento duplo entre os cabos e os barramentos. Todas as vantagens anteriores são mantidas com este esquema real de três posições (linha, aberto e desligado, ligado à terra). A figura 2.7 mostra o diagrama de três posições: [4]

2.2.2 O Futuro

Como resposta às crescentes necessidades energéticas e aos problemas ambientais, tem-se vindo a adotar formas alternativas de produção de energia elétrica cada vez mais limpas e mais eficientes, passando pela aplicação de pequenos geradores junto das cargas recorrendo a fontes de energia renovável. Assiste-se assim a uma mudança de paradigma energético, integrando um novo conceito de produção descentralizada de energia elétrica. Neste âmbito, surgem as *Smart Grids* cuja inclusão nos SEE tem tendência a ser cada vez maior. Estas têm dois grandes objetivos: otimizar a relação entre a oferta e a procura de energia e também proporcionar as condições necessárias para que seja feita a integração de mais unidades de produção distribuída nos SEE. [4]

- Reduzida manutenção

Para ser mais compacta e eficiente a aparelhagem terá de apresentar funções integradas de controlo e monitorização, tornando-se assim essencial o controlo remoto da mesma para que não existam interrupções de serviço demasiado longas para o consumidor final. A auto-regeneração utilizando controlo remoto será a única maneira de encurtar o tempo de perda de alimentação do sistema. Também através de controlo remoto será possível otimizar algumas das cargas presentes na rede de distribuição, operando a sua aparelhagem e alterando as configurações de proteção. [4]

2.3 Resumo

Neste capítulo, inicialmente foi dada uma noção geral do que é a aparelhagem de MT bem como as funções que desempenham nas Redes de Distribuição. Sendo impossível obter redes com uma total fiabilidade fica subjacente que a inclusão de aparelhagem para a proteção das redes é um fator absolutamente fundamental para a qualidade de serviço prestada pelos operadores de rede.

Em seguida, foram descritos os diversos equipamentos de manobra que geralmente constituem a aparelhagem. No subcapítulo dedicado aos equipamentos de manobra foi dada especial ênfase aos disjuntores dado que existe uma grande variedade de tecnologias neste campo e também por estes assumirem um papel de destaque na proteção dos SEE atuais. Tanto quanto possível houve a intenção de apresentar os aspetos construtivos de cada tipo de disjuntor e os respetivos prós e os contras da utilização de cada uma das tecnologias. Ficou explícito que o meio de extinção do arco elétrico que proporciona uma maior rigidez dielétrica é a utilização do gás SF_6 pela capacidade que apresenta de interromper qualquer corrente de curto-circuito. Apesar de tal facto, o seu elevado preço e a possibilidade de ocorrência de fugas leva a que, por diversas vezes, ainda se considere a sua aplicação.

Neste capítulo foi também dada uma perspetiva histórica do que foi a aparelhagem de MT ao longo dos anos. As primeiras tecnologias a surgir utilizavam o ar e o óleo como meio de extinção do arco elétrico, sendo que este último foi muito utilizado até aos anos 70. Já os disjuntores de ar começaram a perder protagonismo com a chegada de aparelhagem moderna, o que deu espaço ao aparecimento de disjuntores a ar comprimido (no período de 1935 até 1945), não conseguindo estes impor-se devido à sua complexidade e elevado preço. Um pouco mais tarde (entre os anos 50 e 60) começaram a desenvolver-se disjuntores com isolamento a SF_6 , que juntamente com os disjuntores a vácuo dominaram o mercado daí em diante.

Finalmente, é ainda feita referência à atualidade no que concerne às tecnologias presentes na aparelhagem antes de, numa abordagem final, se fazer referência às *Smart Grids* e de que maneira a aplicação destas ditas redes inteligentes poderão influenciar a qualidade de serviço no futuro.

Capítulo 3

O fenómeno das Descargas Parciais

Ao longo deste capítulo é escrutinado o fenómeno das DPs, onde são revistos alguns temas como as suas causas, os seus efeitos ou ainda processos de deteção das DPs. O investimento no estudo desta temática poderá no futuro ter impacto não só na performance dos cabos ou transformadores mas também da aparelhagem em geral. Tal como sugere o título da Dissertação, este é também um tema essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

3.1 O que são Descargas Parciais?

As DPs são entendidas como pequenos arcos elétricos que ocorrem dentro de isolamentos de média e alta tensão. Estas são resultado de um colapso elétrico de uma bolsa de ar dentro do isolamento sendo que estas descargas corroem o mesmo e, poderão eventualmente resultar em falhas de isolamento. A ocorrência de DPs pode dar-se em qualquer ponto do isolamento em que a intensidade do campo elétrico excede a rigidez dielétrica do material em questão sendo que estas emitem energia como: [19, 20]

- Emissões eletromagnéticas, na forma de ondas de rádio, luz e calor
- Emissões acústicas, nas gamas audíveis e de ultra-som
- Ozono e óxidos de gases de nitrogénio

A localização da descarga pode ser consequência de um aumento do campo elétrico num determinado espaço. O aumento do campo elétrico pode ser devido a mudanças bruscas da natureza do isolante, as quais podem ser causadas pela presença de gás entre as superfícies de um isolador com um condutor ou com outro isolador.

Para uma DP ocorrer num vazio preenchido com gás duas condições devem ser satisfeitas. Uma delas, ainda que não suficiente, é que o campo elétrico no interior do vazio, ou seja o campo elétrico local, deve ser igual ou superior a um campo mínimo de rutura, determinando o campo elétrico inicial associado à descarga. Além desta condição, deve ainda existir um campo elétrico designado de campo de extinção, abaixo do qual a atividade da descarga deixa de existir. [7]

Para além da presença de gás, existem diversos fatores que podem causar a ocorrência de DPs, tais como: [20]

- Vazios no interior de um isolamento sólido
- A contaminação por partículas na superfície do material isolante
- Irregularidades na superfície de material isolante, como por exemplo pontas afiadas
- Bolhas de gás no isolamento líquido
- Falha mecânica ou danos em materiais de isolamento

3.2 Tipos de descargas parciais

As descargas parciais podem ser classificadas em três categorias de acordo com a sua origem.

3.2.1 Descargas parciais internas

DPs ocorrendo como descarga de gás cercado por material isolante sólido ou líquido são chamadas de DPs internas. As DPs internas ocorrem em espaços vazios ou cavidades cheias de gás no interior do material de isolamento sólido e líquido. Estes vazios na superfície são gerados a partir de descolamento parcial do isolamento da superfície metálica ou pela separação entre dois materiais isolantes. Se o eletrodo ou qualquer outro material condutor está colocado dentro do sólido ou líquido de tal maneira que este aumenta o campo elétrico local, então esta situação resulta em descargas parciais locais e na destruição final do material de isolamento. [21]

Na imagem 3.1 é possível observar as pequenas cavidades ou espaços vazios no interior do isolamento onde se dá a ocorrência de DPs.

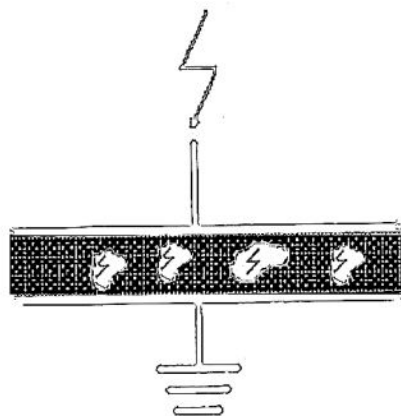


Figura 3.1: Representação de descargas parciais internas [5]

3.2.2 Descargas parciais superficiais

As DPs não são geradas unicamente dentro de um volume isolador líquido ou sólido, sendo que igualmente surgem sobre a superfície isoladora. As DPs superficiais ocorrem em gases ou líquidos na superfície de um material dielétrico, normalmente partindo do eletrodo para a superfície. Uma vez que a componente de campo elétrico da superfície excede um certo valor crítico o processo de DP superficial é iniciado. Este tipo de descargas provocam alterações na superfície do dielétrico que podem levar à rutura completa do isolamento. [7]

Na figura 3.2 está representada uma DP superficial ao longo de um material isolador colocado entre dois eletrodos.

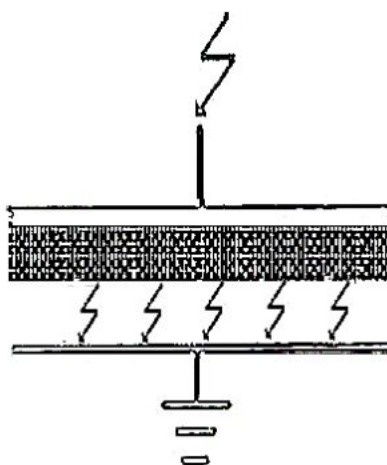


Figura 3.2: Representação de descarga parcial superficial [5]

3.2.3 Descargas parciais externas

As DPs que ocorrem sobre a superfície de um material de isolamento sólido e em gases ao redor de eletrodos são chamadas de descarga parcial externa. O efeito coroa é um exemplo de descarga parcial externa. No caso de DPs externas de alta frequência as interferências eletromagnéticas e os efeitos químicos são fatores mais perigosos quando comparados com os estragos causados no material de isolamento. Este tipo de descargas ocorre principalmente a partir de pontas afiadas. [21]

Na figura 3.3 está representado o fenómeno do efeito de coroa na área tracejada provocado pela ionização do gás isolador existente entre os dois eletrodos.

3.3 Influência das descargas parciais nos dielétricos

A ocorrência de DPs tem efeitos nocivos para o material isolante. Embora as descargas individuais tenham baixo teor de energia, estas provocam uma deterioração progressiva do dielétrico ou

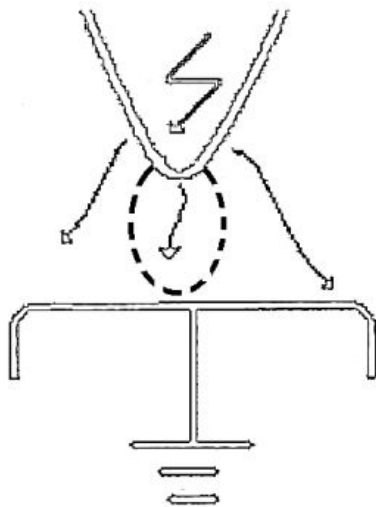


Figura 3.3: Representação de descarga parcial externa [5]

até eventualmente a perfuração do mesmo. Tais situações acontecem devido à concentração local de campos elétricos e devido às suas características repetitivas, levando a mudanças nas propriedades do material isolante. A deterioração dos materiais pode ser causada por diversos fenómenos, como por exemplo: [22]

- Bombardeamento iónico, causando aquecimento do ânodo e do cátodo, provocando a erosão destas superfícies e promovendo processos químicos na superfície (ex: polimerização, formação de gases, entre outros)
- Formação de produtos químicos no gás ionizado (ex: ácido nítrico, ozono, entre outros)
- Formação de irradiação ultravioleta e raio-X.

Estes efeitos são acumulativos e provocam a deterioração progressiva e acelerada do dielétrico, sendo que o fenómeno de deterioração e a expectativa de vida útil do dielétrico estão dependentes de muitas variáveis, tais como o número de descargas e a frequência com que ocorrem, a amplitude e o gradiente da tensão aplicada ou ainda a magnitude da descarga. No caso onde se aplica tensão contínua é expectável um tempo útil de vida bem maior do que para tensões alternadas, dado que o número de descargas será muito menor. [22]

Também dependendo do tipo de material e da natureza do dielétrico, alguns efeitos terão um maior impacto que outros. Dois exemplos entre os diversos materiais utilizados para o isolamento são a resina epóxi e o polietileno. Estes materiais apresentam comportamento distinto quando sujeitos à ação do oxigénio e do ozono, sendo que o polietileno possui uma resistência à degradação por oxigénio e ozono muito menor do que a resina epóxi. [7]

3.3.1 Materiais de isolamento gasosos

Em aplicações ao ar livre o ar tem um papel importante como material isolante e está disponível em grande quantidade sem nenhum custo associado. Como já referido em 2.2 o ar é utilizado como meio de isolamento desde o início da utilização de tecnologias de AT.

Outro material isolante muito utilizado é o SF_6 , este mais utilizado em aplicações de interior como por exemplos sistemas de manobras ou cabos. Este gás é utilizado tanto para a MT como para a AT muito por causa das suas capacidades dielétricas muito boas.

As DPs externas são mais comuns em aplicações ao ar livre, ocorrendo principalmente nas pontas metálicas afiadas e nas arestas pelo aprimoramento dos campos elétricos locais nesses pontos. Campos não homogêneos provocam acelerações nos elétrons à frente dessas pontas afiadas ou arestas, sendo que estes mesmos elétrons colidem elasticamente com moléculas de gás resultando em transferência de energia. Depois disso, fenômenos de dissociação, ionização e excitação de moléculas ocorrem, podendo ainda resultar na formação de ácidos que são muito perigosos. [21]

3.3.2 Materiais de isolamento líquidos

Este tipo de materiais de isolamento são utilizados em recipientes fechados e para além de proporcionar isolamento para aplicações de AT também têm o propósito de arrefecimento do enrolamento de transformadores e extinguir o arco em disjuntores. As propriedades dos materiais de isolamento não são apenas dependentes do material em si, mas também dependem dos conteúdos neles embebidos. O óleo mineral é tido como o mais importante meio de isolamento líquido.

As DPs resultam na carbonização do óleo durante o aquecimento local e na formação de ceras e de ácidos no óleo que aceleram o envelhecimento do material de isolamento. A força do isolamento é diminuída pelos gases dissolvidos e bolhas desenvolvidas nas arestas. Os espaços vazios são preenchidos com gases de baixa constante dielétrica em relação ao líquido de isolamento, portanto existe a possibilidade de rutura do campo elétrico do vazio aquando da operação a tensões de funcionamento normais. Assim, esses espaços vazios nas bolhas distorcem a distribuição do campo e são um ponto de partida das atividades de descarga. [21]

3.3.3 Materiais de isolamento sólidos

Isolamentos sólidos são usados em quase todo o tipo de aparelhagem elétrica. Estes fornecem suporte mecânico para os elétrodos e têm também como função mantê-los longe de alto potencial elétrico. Este tipo de isolamento apresentam um maior valor de tensão de disrupção do dielétrico em relação ao óleo e aos gases.

Os materiais de isolamento sólidos podem ser divididos em duas categorias relativamente às DPs. Materiais como mica, porcelana e em certa medida vidro podem ser considerados como resistentes a DPs pois as propriedades dielétricas que apresentam não são alteradas nem danificadas após longos períodos de descargas. Estes materiais apresentam também um excelente comportamento quando sujeitos às mais variadas temperaturas. Os materiais de polímeros orgânicos como

por exemplo o polietileno, o polietileno reticulado, o PTFE (politetrafluoretileno) ou resinas fundidas são considerados como sensíveis à atuação das DP's. A exposição destes materiais a DP's pode levar à rutura completa do isolamento a longo prazo. [21]

3.3.4 Materiais de composição mista

Os dielétricos de composição mista geralmente utilizados resultam da combinação de materiais sólidos e líquidos, líquidos impregnados em folhas finas de papel ou plástico. É possível obter propriedades dielétricas superiores usando combinação de diferentes dielétricos em comparação com dielétricos individuais. Por exemplo, o material de isolamento líquido preenche as cavidades existentes no material de isolamento sólido sendo que a sua alta resistência combinada de isolamento evita mais facilmente a ocorrência de DP's. Podem ser dados alguns exemplos de alguns dielétricos mistos: [21]

- Condensadores de folha impregnada com hidrocarbonetos
- Resinas epóxi com enchimento de materiais inorgânicos
- Isolamento com folha impregnada com SF_6 em transformadores de medição

A principal vantagem da utilização de dielétricos mistos é que este restringe as DP's para apenas uma porção de isolamento. Existe também a possibilidade de haver danos no dielétrico misto porque podem ser originados pontos fracos no isolamento misto nas camadas limite. Nessas camadas limite podem ser originados espaços vazios na sequência do processo de formação do novo dielétrico e existe a possibilidade de ignição de DP's nessas zonas. No caso do papel a sua carbonização pode aumentar a condutividade na sua superfície e quando a condutividade de um isolador aumenta o isolamento efetivo diminuirá. Um processo de impregnação muito cuidado torna-se importante para as folhas de óleo impregnado com hidrocarbonetos. [21]

As resinas epóxi são preenchidas com materiais inorgânicos, a fim de proporcionar resistência térmica e mecânica, sendo que quartzo e óxidos metálicos podem ser utilizados como materiais inorgânicos. Este é um aspeto que aumenta a resistência elétrica do isolador a longo prazo. No entanto, uma vez que alguma DP seja gerada a partir destes materiais inorgânicos isto resultará num colapso total do sistema de isolamento. Resina epóxi misturada com mica poderá ser outro exemplo de um isolamento sólido de composição mista. Esta solução, quando comparada com a resina epóxi pura, aumenta o tempo de vida útil do isolamento pois os danos são limitados devido à inclusão da mica que é resistente a DP's. No entanto, existe também a possibilidade de se originarem espaços vazios nas fronteiras entre a resina e a mica. [21]

Os materiais inorgânicos são resistentes a DP's por isso estes materiais serão melhores tendo em conta a sua força elétrica. No entanto, em todos os tipos de isoladores ou bushings também é necessária uma alta resistência mecânica pelo que materiais inorgânicos de cerâmica como porcelana ou mica são substituídos por materiais de plástico reforçados com fibra. [21]

3.4 Métodos de detecção

A ocorrência de DPs provoca um conjunto de fenómenos físicos e químicos que podem ser utilizados com o objetivo de detetar a presença dessas mesmas DPs. Os métodos de detecção de DPs podem ser divididos em duas categorias: métodos não elétricos e métodos elétricos.

3.4.1 Métodos não elétricos

3.4.1.1 Detecção por luz

As DPs mais fáceis de ser observadas são as DPs superficiais e as externas (efeito de coroa). Já as DPs internas apenas poderão ser vistas a olho nu se o material isolante for translúcido. A radiação existente é muito tênue podendo no entanto ser intensificada pelo aumento da frequência da tensão aplicada no dielétrico. [22]

3.4.1.2 Detecção por calor

O aumento da temperatura provocado pelas descargas pode ser medido por termoacopladores dispostos ao longo do dielétrico. É possível também sentir o aumento da temperatura na superfície dos cabos e dos bushings submetidos a ensaios de alta tensão por contato manual. Este método é bastante insensível tornado impossível medir a magnitude das descargas. [22]

3.4.1.3 Detecção por ruído acústico

É um método utilizado no caso dos transformadores de potência de AT, onde microfones que operam na faixa do ultra-som estão imersos no óleo isolante. A sensibilidade deste método situa-se em torno dos 50 a 80 pF. Esta é limitada pelo fenómeno de magnetostrição do núcleo do transformador, cuja ação provoca ruído na mesma faixa de frequência. Em ensaios em cabos é possível utilizar microfones fixados na superfície do cabo sendo necessário recorrer a amplificadores e osciloscópios para determinar a localização de descargas ao longo do cabo. [22]

Também ao nível das celas é possível proceder à detecção de descargas recorrendo também a sensores de ultra-som, que são particularmente eficientes a medir DPs superficiais. Para efetuar a detecção da atividade de DPs no interior das celas utilizam-se os sensores TEV (Transient Earth Voltage), que detetam a emissão de ondas eletromagnéticas vindas do interior, ou ainda sensores UHF (Ultra High Frequency) que detetam a emissão sob a forma de ondas rádio. Estes últimos sensores têm a particularidade de serem eficientes também na detecção de descargas em situações de isolamento em que se utiliza gás. Nas figuras 3.4 e 3.5 são apresentados um exemplo de um sensor TEV e um exemplo de um sensor UHF, respetivamente.

3.4.1.4 Transformações químicas

A formação de produtos químicos aquando da ocorrência de descargas pode ser utilizada para detecção e localização tendo muitas vezes que se demolir o material dielétrico para verificação.

Por exemplo, descargas em óleo isolante geram gases muito específicos, os quais podem indicar a presença de descargas. [22]



Figura 3.4: Sensor TEV utilizado para deteção de emissão de ondas eletromagnéticas [6]



Figura 3.5: Sensor UHF que deteta ondas rádio [6]

3.4.1.5 Pressão de Gás

Quando ocorre uma descarga originam-se algumas reações químicas, sendo que a pressão do gás decresce quase imediatamente à ocorrência das descargas. Medindo a pressão nas cavidades do isolamento pode dar indícios sobre a ocorrência ou não de DPs. Este é um método muito restrito e a sua sensibilidade não é conhecida. [22]

3.4.2 Métodos Elétricos

A ocorrência de uma DP dentro de um espaço vazio provoca uma rápida transferência de cargas para as superfícies opostas ao espaço vazio, na direção do campo elétrico aplicado. Desta

transferência de cargas surgem impulsos elétricos de curta duração. Para detectar esses impulsos provocados pelas DPs são utilizados circuitos cuja configuração deve favorecer a propagação dos impulsos e otimizar sua detecção. Na figura 3.6 é apresentado um circuito tipicamente utilizado para detecção de DPs. Os elementos básicos do circuito a utilizar são: uma fonte de alta tensão alternada, um condensador de acoplamento (representado pela letra k) isento de DPs na tensão de ensaio, o que facilitará a circulação dos impulsos de corrente de alta frequência, o objeto de teste (representado pela letra a), uma impedância de medição (representado pela letra Z), um amplificador e finalmente um osciloscópio.

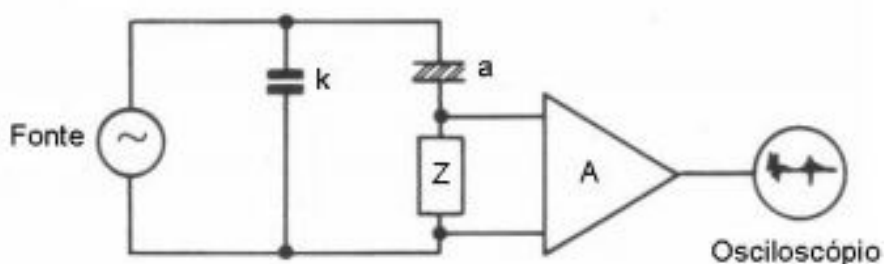


Figura 3.6: Circuito tipicamente utilizado para detecção de descargas parciais [7]

A fonte de tensão alternada alimentará todo o circuito. Para que o impulso de corrente devido à DP se possa propagar e possa ser detectado na impedância de medição, um condensador de acoplamento é colocado em paralelo com o objeto de teste. Desta forma, é formado um caminho de baixa impedância para o impulso resultante da descarga circular. O impulso desenvolvido na impedância de medição é posteriormente amplificado pelo amplificador, cuja escolha da banda de passagem depende da configuração da impedância de medição utilizada, podendo ser esta uma resistência ou um circuito ressonante.

Uma resistência é utilizada como impedância de medição quando o objetivo consiste no registro da forma de onda do pulso e na avaliação de parâmetros relacionados com o sinal detectado. Esta impedância de medição é utilizada em medidas de DPs com resolução temporal. Já o circuito ressonante é utilizado quando se deseja obter padrões de descarga, onde a carga aparente transferida e o instante de sua ocorrência são registrados, sendo utilizado em medidas de DPs com resolução em ângulo de fase.

Uma variação do circuito de detecção apresentado consiste em colocar a impedância de medição em série com o condensador de acoplamento. Ambos os circuitos, seja com a impedância de medição em paralelo ou em série são eletricamente iguais: a mesma tensão ocorre ao redor da impedância Z , assumindo que a impedância da fonte de alta tensão seja grande. [22]

3.4.3 Medição de descargas parciais

O ensaio de DPs é um ensaio não destrutivo cuja finalidade é medir o nível de DPs em um determinado equipamento, para uma determinada tensão. Estes ensaios são uma forma adequada de detetar certos defeitos no equipamento sujeito a testes e é um complemento útil aos testes dielétricos. A medição de DPs é apropriada para aparelhagem com invólucro metálico se isoladores inorgânicos forem utilizados no seu interior e recomendada para compartimentos preenchidos com fluídos. [23]

De maneira geral, o nível de DPs medido deve estar abaixo de um valor prefixado por norma ou especificação do equipamento ensaiado. As medições podem ser enquadradas em três diferentes níveis: [20]

- Nível 1, onde a atividade de DPs não está presente ou não está em níveis críticos. Os resultados dão a garantia de que o desenvolver de falhas relacionadas com as DPs não é suscetível de acontecer.
- Nível 2, onde a atividade de DPs está a um nível que indica que uma falha se está a desenvolver fruto desta atividade e requer posterior investigação e monitorização.
- Nível 3, onde a atividade de DPs está a um nível que indica que uma falha está já em estado avançado de desenvolvimento. Esta falha é suscetível de criar uma insuficiência iminente e o dielétrico poderá ser energizado para níveis que se tornam perigosos para as pessoas. Este nível de atividade requer a necessidade de intervenção imediata.

Alterações visíveis na medição da atividade de DPs tornam possível prever com um elevado grau de precisão quando é que uma falha é mais suscetível de se desenvolver e se tornar em insuficiência do isolamento. Assim sendo, os operadores podem tomar as medidas adequadas oportunamente para corrigir as falhas à medida que estas se desenvolvem e por consequência evitar interrupções de serviço da aparelhagem. [20]

3.5 Resumo

Em primeiro lugar, neste capítulo é apresentada uma definição do que são as DPs bem como os tipos de DP que existem, fazendo também referência às emissões que estas produzem. São ainda referidos diversos fatores que podem causar a ocorrência deste tipo de descargas.

De seguida, foi estudada a influência que as DPs podem ter nos materiais dielétricos. Ficou claro neste tópico que embora as descargas individuais tenham baixo teor energético, a ocorrência destas recorrentemente tem efeitos nocivos para o material isolante. Quanto ao fenómeno de deterioração e a expectativa de vida útil do dielétrico estão dependentes de diversos acontecimentos como o número de descargas e a frequência com que ocorrem, a amplitude e o gradiente da tensão aplicada ou ainda a magnitude da descarga. Houve também a intenção de fazer referência à influência das DPs para diferentes tipos de materiais de isolamento (gasosos, líquidos, sólidos e de composição mista).

Quanto à deteção das DPs, esta foi dividida em deteção por métodos não elétricos e por métodos elétricos. Nos métodos não elétricos são apresentados métodos de deteção por luz, por calor, por ruído acústico, por transformações químicas e por pressão de gás. Quanto aos métodos elétricos é apresentado um circuito tipicamente utilizado para deteção de DPs e também possíveis variações do mesmo.

Finalmente é ainda abordada a medição de DPs. Esta é uma temática importante pois a medição da atividade das descargas é que irá permitir detetar falhas iminentes ou já em avançado estado de desenvolvimento e que necessitem de intervenção imediata.

Capítulo 4

Caso de Estudo

Este capítulo tem como principal objetivo descrever um tipo específico de aparelhagem de MT no qual se baseará o estudo realizado ao longo desta Dissertação, a solução compacta e modular FLUOFIX GC, produzido pela Efacec. Relativamente a esta solução serão abordadas vertentes como os aspetos de ordem construtiva ou técnica ou ainda as unidades modulares existentes.

A problemática desta solução encontra-se nos níveis de DPs apresentados por um dos componentes do FLUOFIX GC, o tubo porta fusível, quando exposto a certos níveis de tensão. O objetivo do estudo passará por diminuir ou até eventualmente eliminar toda a atividade de DPs neste componente da cela para a solução de tensão nominal 24 kV.

4.1 O que é o FLUOFIX GC?

A unidade FLUOFIX GC é um RMU com isolamento integral a SF_6 e pertence a uma gama de quadros modulares e compactos, de interior para aplicação em redes de MT até 36 kV. Este tipo de aparelhagem é utilizado na Distribuição Secundária e vai desde a Produção de Energia (Eólica, Fotovoltaica, entre outras) até à Distribuição de Energia Elétrica para as várias indústrias e aplicações. As suas aplicações mais comuns são em: [10]

- Postos de transformação
- Postos de seccionamento
- Postos de distribuição pública e privada

4.2 Características construtivas

A cuba da cela FLUOFIX GC é construída em aço inoxidável e preenchida com gás SF_6 , à pressão relativa de 0,3 bar. A segurança de operação terá de ser garantida pela realização de ensaios em conformidade com as mais exigentes normas bem como pela construção e estanquidade das soluções. As celas FLUOFIX são imunes a condições adversas (por exemplo elevada humidade, elevadas temperaturas, ambiente salino) e proporcionam uma ausência de manutenção das

partes ativas devido ao seu isolamento a gás SF_6 , sendo que este equipamento apresenta longa vida elétrica e mecânica com um tempo de vida útil previsto de 30 anos. Apesar da não necessidade de manutenção, após uma interrupção de serviço, seja ela prolongada ou não, é aconselhável a execução de algumas operações: [8, 10]

- Inspeção visual para confirmação do bom estado do equipamento
- Verificação do correto funcionamento dos comandos e encravamentos
- Comprovação da correta colocação dos conectores de cabos

A figura 4.1 apresenta um exemplo de uma solução FLUOFIX GC com duas unidades modulares. Este tipo de unidades estão equipadas com Interrutor-Seccionador, fusíveis e/ou disjuntores de vácuo e são desenvolvidas de acordo com a Norma CEI 62271-200. Este tipo de aparelhagem permite ainda que se faça um controlo e monitorização remotamente. [10]



Figura 4.1: Cella de Média Tensão FLUOFIX GC [8]

A sua construção modular e compacta é de fácil instalação devido às suas dimensões e peso e permite o acoplamento de unidades extensíveis, sem a necessidade de manusear o gás no interior da cuba. Estas unidades extensíveis têm na sua composição uma tampa isolante de proteção em cada fase que apenas é retirada no momento do acoplamento com outra unidade. Quanto aos tubos porta fusíveis, estes estão montados numa posição horizontal e possibilitam um acesso frontal. [10]

4.2.1 Manobra dos comandos

Na parte frontal da cela estão presentes os comandos dos interruptores-seccionadores. Estes mecanismos são manobrados através de uma alavanca anti-retorno cuja função é impedir que se

abra o interruptor imediatamente após a realização de uma manobra de fecho. Na figura 4.2 estão representadas as três posições possíveis deste tipo de comando. [9]



Figura 4.2: Três posições possíveis dos comandos dos interruptores-seccionadores [9]

4.2.2 Disjuntores DIVAC

Na cuba do FLUOFIX estão instalados disjuntores DIVAC, caracterizados por serem disjuntores constituídos por três polos, podendo estes estar dispostos de forma transversal ou longitudinal, que utilizam a tecnologia de corte no vácuo. O seu princípio de funcionamento de corte no vácuo, conjuntamente com uma construção simples e robusta, garantem uma elevada fiabilidade. Estes disjuntores são equipamentos de interior de dimensões reduzidas capazes de alcançar excelentes prestações elétricas e mecânicas sem recorrer a grandes quantidades de energia para realizar as manobras de fecho/abertura. Tanto os comandos dos disjuntores como dos interruptores-seccionadores podem ser munidos de monitorização, bobina de abertura ou algum outro equipamento de controlo remoto da unidade. [10] A figura 4.3 permite verificar a sua aplicação no interior da cuba estanque, sendo que o disjuntor visível está aplicado numa unidade CIS. De notar que no topo existe um barramento terra que é comum a todos os disjuntores.

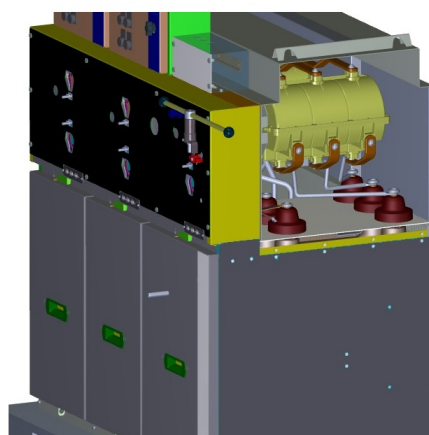


Figura 4.3: Disjuntores DIVAC localizados dentro da cuba estanque

4.2.3 Tubos porta-fusíveis

As celas FLUOFIX GC 2IS+1CIS dispõem de três tubos porta fusíveis, montados na parte inferior da unidade CIS. Estes estão montados na horizontal e oferecem a possibilidade de um acesso frontal.

Os tubos porta-fusíveis são feitos à base de resina epóxi. As resinas epóxi, utilizadas muitas vezes enquanto isoladores, adesivos ou incapsulantes, possuem uma alta rigidez dielétrica, alta dureza, excelente aderência, alta resistência química e podem ser aplicadas à temperatura ambiente ou curado em estufa. Após aplicadas e curadas as resinas são extremamente resistentes e impermeáveis. [24, 25]

A figura 4.4 apresenta o formato de um tubo porta-fusível.



Figura 4.4: Tubo porta-fusível sem metalização

No exterior, com recurso ao processo de metalização, o tubo porta fusível é revestido com uma película fina de zinco. Sendo que este processo não é aplicado à totalidade do tubo, na figura 4.5 é possível verificar a metalização a cor cinzenta. Esta película de zinco é ligada à massa e garante uma zona de potencial zero ao longo da sua aplicação.

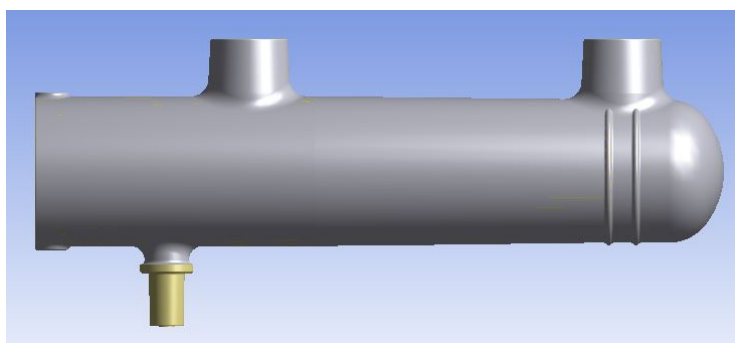


Figura 4.5: Tubo porta-fusível com metalização

Em ambas as extremidades existem abraçadeiras de forma a fixar o fusível quando este é colocado dentro do tubo. Assim sendo, existe uma abraçadeira na tampa que permite o acesso

frontal ao tubo, como mostra a figura 4.6, e uma outra na extremidade oposta, visível na figura 4.7.

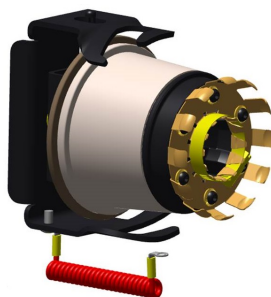


Figura 4.6: Tapa colocada numa das extremidades do porta-fusível



Figura 4.7: Interior do tubo porta-fusível

Os fusíveis a aplicar nos porta-fusíveis são do tipo HRC e são fabricados de acordo com a norma CEI 60282/DIN. [10]

4.3 Características técnicas gerais

A gama FLUOFIX GC possui vários níveis de tensão nominal (12 kV, 17.5 kV, 24 kV, 36 kV). No âmbito do estudo em questão será utilizada a solução com tensão nominal de 24 kV pelo que a tabela 4.1 apenas apresenta as características técnicas para este caso.

4.4 Unidades modulares

Uma cela FLUOFIX GC não apresenta sempre a mesma disposição dado que a sua construção resulta da conjugação de diversas unidades modulares. Serão então apresentadas em seguida algumas das funções tipo mais utilizadas na construção das celas.

Tabela 4.1: Características técnicas da unidade FLUOFIX GC de 24 kV [10]

Tensão Nominal	24 kV
Nível de isolamento	
Frequência Industrial (50 Hz - 1 min)	50 kV
Ao choque(1,2/50 μ s)	125 kV
Corrente nominal	
Barramento	400 A / 630 A
Chegada/Saída	400 A / 630 A
Proteção por fusível	200 A
Proteção por disjuntor	400 A / 630 A
Corrente de curto-circuito	16 kA (1s) 20 kA (3s)
Poder de corte sob curto-circuito	40 kA 50 kA
Frequência	50 Hz
Temperatura ambiente	-5 a 40°C
Pressão de enchimento normal (20°C)	0,3 bar rel

4.4.1 Unidade IS

Esta unidade é entendida como uma função Interruptor Seccionador. Esta é uma unidade para chegada e saída de cabos equipada com interruptor-seccionador ISFG. A figura 4.8 mostra o diagrama correspondente à função IS. [9]

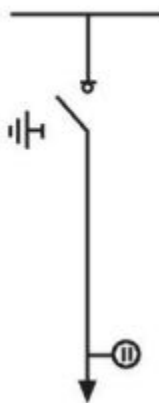


Figura 4.8: Função Interruptor Seccionador [9]

4.4.2 Unidade CIS

Esta unidade é entendida como uma função Proteção de Transformador. Esta é uma unidade para proteção de transformadores equipada com tubos porta fusíveis e interruptor-seccionador ISFG. A figura 4.9 mostra o diagrama correspondente à função CIS. [9]

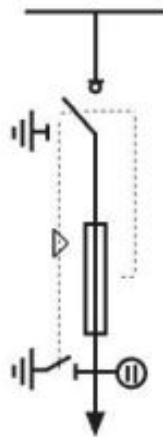


Figura 4.9: Função Proteção Transformador [9]

4.4.3 Unidade DC

Esta unidade é entendida como uma função Proteção de Cabos. Esta é uma unidade para proteção de cabos equipada com disjuntor de vácuo e com interruptor-seccionador ISFG. A figura 4.10 mostra o diagrama correspondente à função DC. [9]

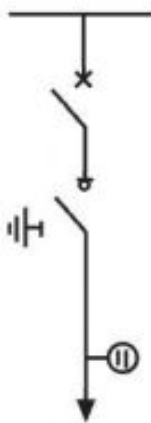


Figura 4.10: Função Proteção de Cabos [9]

4.4.4 Unidade SB

Esta unidade é entendida como uma função Seccionamento de Barras. Esta é uma unidade para seccionamento de barras com interruptor-seccionador ISFG. A figura 4.11 mostra o diagrama correspondente à função SB. [9]

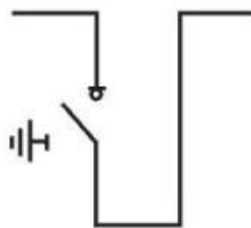


Figura 4.11: Função Seccionamento de Barras [9]

4.5 Unidades compactas

As configurações usualmente disponíveis de celas compactas FLUOFIX GC são obtidos pela conjugação das funções tipo apresentadas no subcapítulo 4.4. Estas unidades compactas podem ser extensíveis ou não extensíveis. Na figura 4.12 podem ser vistas alguns exemplos de configurações habituais que formam unidades compactas.

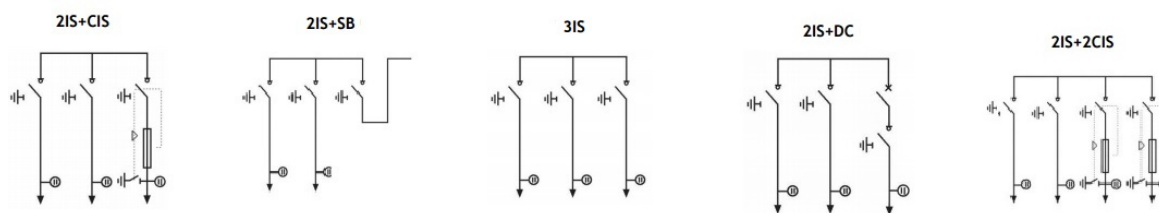


Figura 4.12: Exemplos de algumas configurações da cela FLUOFIX GC [9]

4.6 Presença de tensão e concordância de fases

As celas FLUOFIX GC dispõem de sinalizadores de presença de tensão L1, L2, L3, montados sobre o painel de comando. Dispõem ainda de pontos de teste facilmente acessíveis para a verificação da concordância de fases através de equipamento móvel. [10]

4.7 Ligação do circuito à terra

Todos os componentes da unidade FLUOFIX GC, tais como barramentos, ligações de cabos, fusíveis, entre outros, se encontram interligados e ligados à terra através de um circuito comum. [10]

4.8 Resumo

O caso de estudo da presente Dissertação é a solução desenvolvida pela Efacec, a cela FLUOFIX GC, mais especificamente o seu componente em resina epóxi, o tubo porta fusível. É um tipo de aparelhagem elétrica utilizado na Distribuição Secundária e é aplicado desde a produção de energia até à distribuição de energia.

A cuba da cela FLUOFIX GC é construída em aço inoxidável e preenchida com gás SF_6 , à pressão relativa de 0,3 bar. A utilização deste gás como isolante possibilita a ausência de manutenção de manutenção das partes ativas, apresentando um tempo de vida útil de cerca de 30 anos. Tem no seu interior elementos como disjuntores de vácuo ou tubos porta fusíveis e apresentam no exterior, na parte frontal da cela, os comandos dos interruptores-seccionadores.

Este tipo de solução poderá apresentar várias disposições resultando de diversas conjugações de unidades modulares. O presente estudo centra-se numa solução de três unidades 2IS+CIS, estando o componente problemático, o tubo porta fusível, localizado na unidade CIS.

A problemática do componente em estudo, o tubo porta fusível, centra-se nos níveis de DPs presentes durante o funcionamento do mesmo. O propósito deste projeto será estudar novas soluções a aplicar no tubo porta fusível e que permitam uma melhor performance dielétrica do componente.

Capítulo 5

Metodologia

Este capítulo faz uma descrição da metodologia utilizada ao longo desta Dissertação para o estudo do fenómeno de DPs no tubo porta fusível. Como tal, serão apresentados os diversos passos a tomar e descritas as diversas análises a realizar.

5.1 Tipo de Estudo

Como referido na secção 3.1, as DPs ocorrem quando a intensidade do campo elétrico excede a rigidez dielétrica do material em questão. Assim sendo, o objetivo passa por recorrer a uma análise de elementos finitos de modo a calcular os campos elétricos que incidem no isolamento e em que medida estes provocam a disrupção do dielétrico.

Na unidade FLUOFIX GC, os componentes mais críticos ao nível do fenómeno de DPs são os tubos porta fusíveis. Assim, será utilizado um modelo a três dimensões dos tubos para realizar a análise de elementos finitos. Para o efeito será utilizado o *Workbench* do *software Ansys 17.0*, desenvolvido pela *Ansys Inc*.

O objetivo passa por realizar simulações para diferentes morfologias tanto ao nível da espessura do material de isolamento do tubo porta fusível como do formato dos terminais situados no seu interior. Em primeiro lugar é realizada uma análise para o formato que é utilizado atualmente e posteriormente será analisada a possibilidade de algumas novas soluções serem aplicadas no tubo porta fusível.

5.2 Análise de Elementos Finitos

O *software Ansys* permite efetuar uma grande variedade de análises. Neste caso, pretende fazer-se uma análise elétrica para fazer um estudo da incidência de campos elétricos no isolamento do tubo porta fusível. A figura 5.1 apresenta a organização de uma análise elétrica no *software Ansys*.

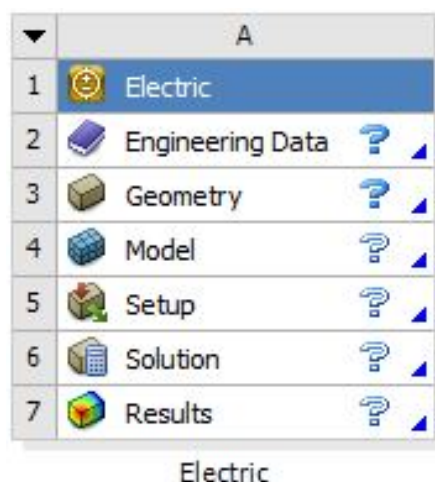


Figura 5.1: Organização de uma análise elétrica no *software Ansys*

5.2.1 Construção da biblioteca de materiais

Em primeiro lugar é fundamental que exista uma biblioteca de materiais onde estejam presentes os dados necessários a uma análise elétrica, presentes no separador *Engineering Data*. Assim, o primeiro passo passa por descobrir os dados que por defeito o *software* utiliza para uma análise elétrica. A figura 5.2 mostra o material apresentado por defeito, o aço estrutural, quando se inicia uma análise elétrica no *Ansys* e o tipo de informação que necessita para este tipo de análise.

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	Structural Steel			G	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5 -110.1
*	Click here to add a new material				

Properties of Outline Row 3: Structural Steel								
	A	B	C	D	E			
1	Property	Value	Unit					
2	Isotropic Resistivity	1,7E-07	ohm m					

Figura 5.2: Material apresentado por defeito quando se inicia uma análise elétrica no *Ansys*

Considerando a figura 5.2. conclui-se que a única informação a que a análise elétrica do *Ansys* recorre é a resistividade isotrópica.

Quanto à biblioteca a construir, esta será constituída pelos materiais atualmente utilizados no tubo porta fusível da unidade FLUOFIX GC. São eles:

- O alumínio, utilizado nos materiais condutores situados no interior do tubo
- O cobre, utilizado numa pequena rede condutora no interior do tubo
- A resina epóxi, que representa o material isolante do tubo

- O zinco, que é utilizado na metalização e tem o objetivo de criar uma película fina no exterior do tubo
- O latão (58% Cobre), utilizados em duas peças que servem para o encaixe da tampa do tubo porta fusível e para o aperto do condutor que faz a ligação ao ponto de terra comum da cela

A tabela 5.1 apresenta os valores de resistividade elétrica utilizados para cada material utilizado nas simulações no *Ansys*. [26, 27, 28]

Tabela 5.1: Lista de materiais e respetiva resistividade elétrica utilizados nas simulações do *Ansys*

Material	Resistividade Elétrica (ohm . m)
Alumínio	$2,65 \times 10^{-8}$
Cobre	$1,274 \times 10^{-8}$
Resina Epóxi	10×10^{13}
Zinco	$5,92 \times 10^{-8}$
Latão (58% Cobre)	$5,9 \times 10^{-8}$

5.2.2 Importação da geometria

O segundo passo da análise elétrica será obter a geometria do modelo do tubo porta fusível. O *Workbench* do *Ansys* utiliza uma ferramenta denominada *DesignModeler* que serve precisamente para fazer o desenho de um modelo ou para gerar um modelo criado a partir de outro software que seja importado para o *Ansys*. Dado que existia já um modelo do tubo porta fusível desenhado por parte da Efacec e que foi disponibilizado no âmbito deste projeto, não foi necessário dispensar tempo com o desenho de raiz do modelo.

No caso do presente trabalho o modelo do tubo porta fusível foi importado para o *Ansys* com o formato *Parasolid*.

5.2.3 Geração da malha do modelo

O processo de geração da malha do modelo é uma parte fundamental de uma simulação recorrendo a elementos finitos. Um número excessivamente baixo de elementos finitos pode comprometer seriamente a veracidade da solução obtida sendo por isso necessário proceder a um refinamento da malha, ou seja, correr a simulação com um elemento mais refinado, aumentando o número de elementos finitos. No entanto, é necessário encontrar um elemento adequado pois o excesso de elementos finitos pode levar a tempos de simulação muito elevados ou ainda à interrupção da simulação, dado que neste trabalho é utilizada uma licença académica do *Ansys* que tem um limite máximo de número de elementos.

Por entre os diversos casos a estudar existirá a tentativa de, através do ajuste manual do tamanho dos elementos, utilizar aproximadamente o mesmo número de elementos para todas as simulações.

5.2.4 Definição das condições do modelo

Para definir as condições do modelo o *Workbench* do *Ansys* recorre à ferramenta *Mechanical APDL*. O primeiro passo nesta ferramenta será atribuir a cada sólido do modelo o material correspondente de entre aqueles presentes na biblioteca construída anteriormente.

A figura 5.3 permite visualizar os diferentes componentes do tubo e as respetivas atribuições de materiais.

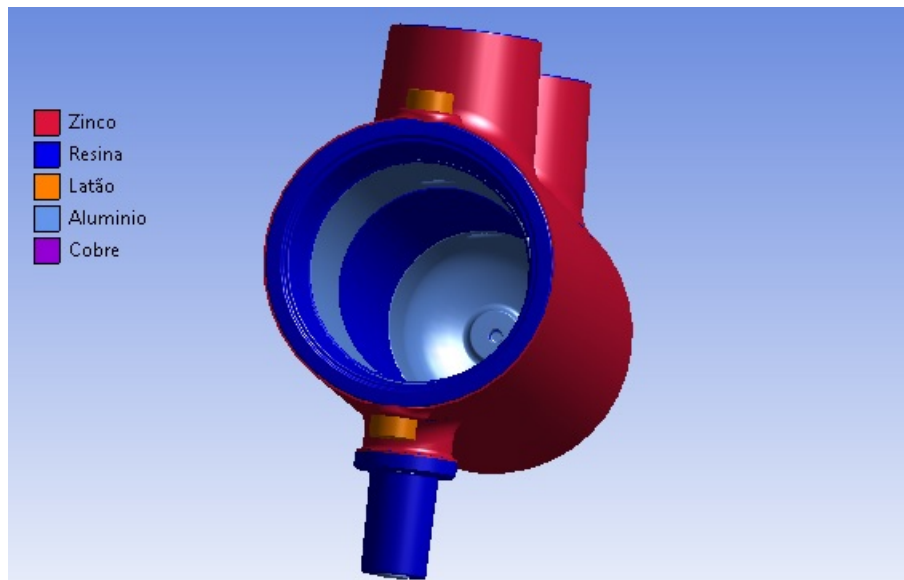


Figura 5.3: Visualização dos diferentes materiais do tubo porta fusível

Em seguida, será necessário definir os níveis de voltagem pretendidos para alguns dos componentes do modelo. Assim, a voltagem será aplicada nos sólidos correspondentes aos terminais existentes no interior do tubo porta fusível e que estarão em contacto com o fusível. A figura 5.4 mostra em realce a localização e o formato do terminal no interior do tubo onde será aplicada tensão.

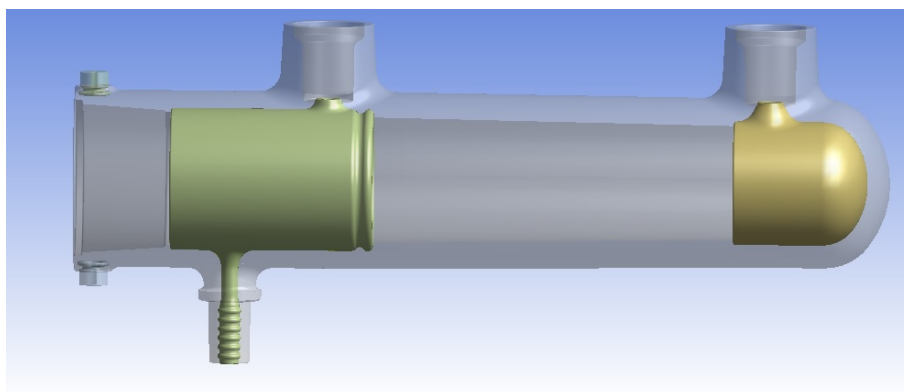


Figura 5.4: Visualização dos terminais no interior do tubo

Consultando a Norma IEC 62271-200 (*AC metal-enclosed switchgear and controlgear 1 kV to 52 kV*), esta diz que a quantidade máxima admissível de descargas parciais a um nível de $1,1U_r$ deverá ser acordada entre o fabricante e o utilizador. Neste trabalho a unidade FLUOFIX GC utilizada é a unidade de 24 kV logo, respeitando a norma referida, a voltagem a ser aplicada no modelo será de 26,4 kV.

Outro fator essencial passa por definir a camada fina exterior de zinco e os componentes em latão com potencial zero pois a sua presença tem o objetivo de servir como ponto de ligação do tubo à terra.

5.2.5 Escolha do tipo de solução e tratamento de resultados

Neste último passo será necessário escolher o tipo de solução que se deseja observar no final do processo, também na ferramenta *Mechanical APDL*. O *Ansys* possibilita o cálculo de diversos tipos de solução tais como a voltagem, intensidade total dos campos elétricos, os campos elétricos direcionais, a intensidade total de corrente ou perdas Joule. Cabe ao utilizador fazer a seleção das soluções que pretende que o software calcule e que pretende visualizar no final.

Neste caso a solução que interessa analisar é a representação da intensidade total do campo elétrico no tubo porta fusível. Também ao nível do separador das soluções, é possível simular sondas que possibilitam a medição da voltagem ou da intensidade total do campo elétrico em pontos específicos do modelo que o utilizador pretenda. Esta é uma ferramenta útil de modo a verificar que todas as condições de voltagem impostas anteriormente se cumprem.

Uma vez concluído o processo de simulação os diferentes níveis de intensidade do campo elétrico são divididos por diferentes cores para uma melhor percepção ocular. Estes níveis são automaticamente criados pela ferramenta de acordo com os valores mínimos e máximos detetados no modelo. No entanto, por vezes será necessário proceder a um ajuste manual destes intervalos pois ocorrem situações em que os intervalos definidos automaticamente não são os mais apropriados e consequentemente não permitem uma boa verificação da atuação dos campos elétricos no tubo porta fusível.

5.2.6 Comparação de resultados com valores de rigidez dielétrica

Após todo o processo de cálculo da intensidade de campos elétricos no tubo porta fusível, é necessário verificar se a rigidez dielétrica do material é ultrapassada. Se os campos gerados forem superiores à rigidez dielétrica do material então dar-se-á o contornamento do isolante, o que poderá provocar a perfuração da sua massa a longo prazo.

Um componente construído à base de resina epóxi básica deverá apresentar uma rigidez dielétrica na ordem dos 19,7 kV/mm. [29]

5.3 Cenários a simular

Como foi referido anteriormente neste capítulo, serão simulados e analisados diversos cenários para uma possível aplicação no tubo porta fusível. Apresentam-se em seguida todas os cenários considerados para simulação no *Ansys* com uma pequena descrição dos mesmos e algumas imagens que ajudam a perceber eventuais alterações nos modelos utilizados.

5.3.1 Cenário 1

O primeiro cenário a ser simulado será o tubo porta fusível original sem estar sujeito a nenhuma alteração. Será a partir dos resultados obtidos neste cenário que todos os outros cenários serão analisados servindo este como ponto de comparação com os restantes casos.

5.3.2 Cenário 2

Em ensaios laboratoriais de DPs a Efacec utiliza duas peças adicionais, uma vareta para aplicação de tensão no terminal de cabo do porta fusível e uma ferramenta que fará a ligação dos terminais no interior do porta fusível. A figura 5.5 mostra a cor amarela a aplicação da dita ferramenta e da vareta junto dos terminais do tubo porta fusível.

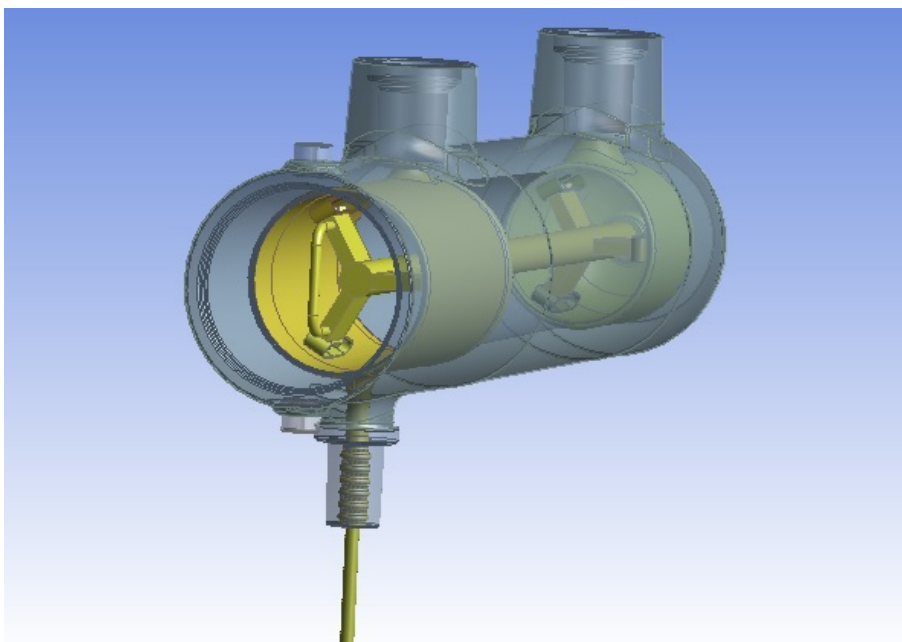


Figura 5.5: Aplicação da vareta e de ferramenta para ligar os terminais do interior do tubo porta fusível

Estas duas peças não estarão presentes quando o tubo porta fusível for aplicado na cela, sendo para uso exclusivo na realização dos ensaios laboratoriais. Assim sendo, o objetivo da simulação deste cenário passa por verificar se a aplicação da vareta e da dita ferramenta na realização de ensaios de DPs em laboratório influencia ou não significativamente os resultados obtidos.

5.3.3 Cenário 3

Uma das zonas mais problemáticas do tubo porta fusível ao nível das DPs está na parte frontal do tubo, nas fronteiras entre os terminais e a resina. Assim, foi introduzida uma pequena alteração no terminal frontal do tubo com o intuito de tentar baixar os níveis de campos elétricos nesse local.

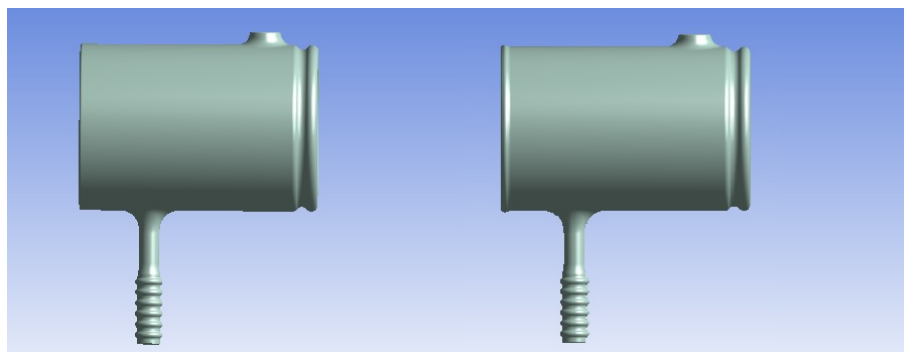


Figura 5.6: Alteração introduzida no terminal frontal do tubo porta fusível

A figura 5.6 mostra a alteração introduzida no modelo, estando do lado esquerdo o modelo original e do lado direito o modelo ligeiramente alterado. A alteração introduzida pode ser vista comparando o lado esquerdo de cada terminal. No novo modelo do lado direito, a ser utilizado no cenário 3, é possível ver na fronteira uma forma ligeiramente arredondada ao contrário do modelo original que apresenta um formato liso.

5.3.4 Cenário 4

No quarto cenário a ser simulado será introduzida uma alteração na resina epóxi que forma o tubo, que será um aumento da sua espessura. No entanto, no interior da cela, existem algumas limitações em termos de espaço pois estão dispostos três tubos porta fusíveis lado a lado. Horizontalmente não há espaço suficiente para proceder a um aumento de espessura dos tubos, porém, numa direção vertical, existe um espaço aceitável para trabalhar e que permite realizar o aumento de espessura pretendido. Assim sendo, aumentando a espessura da resina apenas em direções verticais, o tubo passará a apresentar um formato ovalizado em vez de arredondado.

A figura 5.7 mostra a diferença existente entre os formatos dos dois tubos, do lado esquerdo o formato original e arredondado e do lado direito, após a alteração instituída, com um formato ligeiramente oval.

Apesar de não ser tão nítido quanto o desejável, o facto é que o aumento de espessura é de apenas alguns milímetros. Contudo, é expectável que esta pequena modificação tenha influência nos resultados dado que a espessura original é também de apenas alguns milímetros, pouco mais de 20 milímetros.

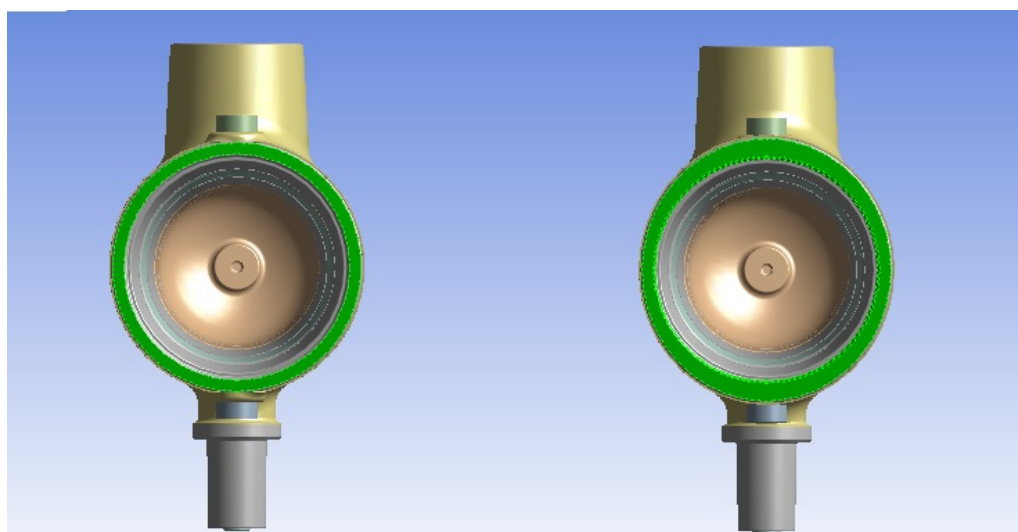


Figura 5.7: Alteração introduzida na resina do tubo porta fusível

5.3.5 Cenário 5

No quinto cenário será introduzida uma nova mudança no terminal frontal do tubo. Tendo como base o modelo do tubo porta fusível apresentado no Cenário 4, com um formato ligeiramente oval, é agora aplicada uma alteração na parte inferior do terminal frontal que serve para o encaixe da vareta. A figura 5.8 mostra a alteração introduzida no modelo, estando visível do lado esquerdo o modelo original e do lado direito o modelo alterado. Tal alteração consiste na eliminação das ondulações existentes na parte inferior do terminal frontal do tubo, passando este local a apresentar uma superfície lisa.

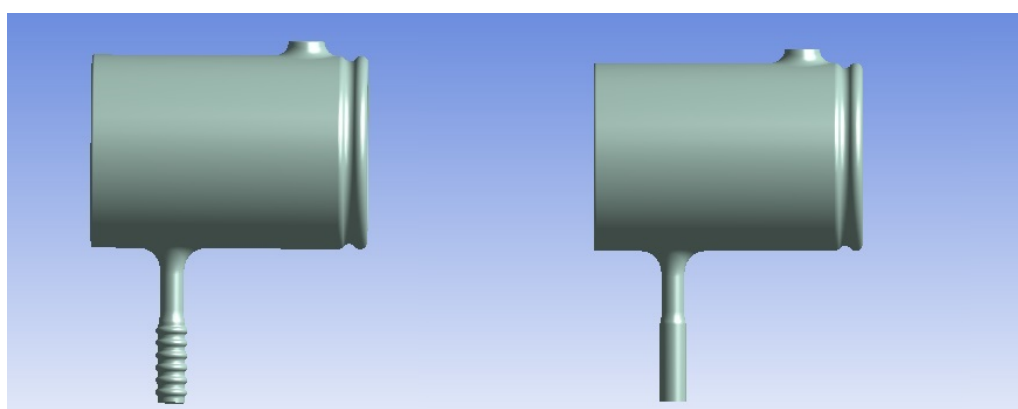


Figura 5.8: Alteração introduzida no terminal frontal do tubo porta fusível

5.4 Resumo

Este capítulo apresenta a metodologia seguida ao longo da presente Dissertação. Numa primeira instância, é apresentado o tipo de análise que servirá de base ao desenvolvimento do trabalho assim como o *software* a utilizar. Em seguida, estão discriminados os passos a seguir na utilização do *Ansys* para efetuar uma análise elétrica, de modo a obter o cálculo da intensidade de campos elétricos no tubo porta fusível. Estão ainda expostos os procedimentos tomados uma vez obtida a solução através da simulação no *Ansys*.

Numa segunda fase deste capítulo, são apresentados os diversos cenários a simular no *Ansys*. O primeiro cenário a simular será o correspondente ao tubo original e que atualmente é utilizado na solução FLUOFIX GC e servirá como base de comparação para todos os outros modelos a simular. Todos esses modelos adicionais a simular, estão apresentados neste capítulo com uma breve explicação para cada um deles.

Capítulo 6

Resultados e Discussão

Neste capítulo apresentam-se os vários cenários simulados e em seguida discutem-se os resultados obtidos através destas mesmas simulações. Os resultados, como referido anteriormente, são obtidos com recurso ao *Worbench* da ferramenta *Ansys* 17.0 e têm o propósito de perceber de que forma os níveis de DPs podem ser melhorados num certo componente do FLUOFIX GC, o tubo porta fusível.

Considerando que o tubo porta fusível é simétrico e de modo a permitir uma melhor visualização dos resultados, foi criado um plano que corta o tubo a meio e que permite observar o interior do mesmo, como mostra a figura 6.1. Uma vez que o tubo é simétrico, considera-se que a metade do tubo que não está representada apresentará um comportamento semelhante.

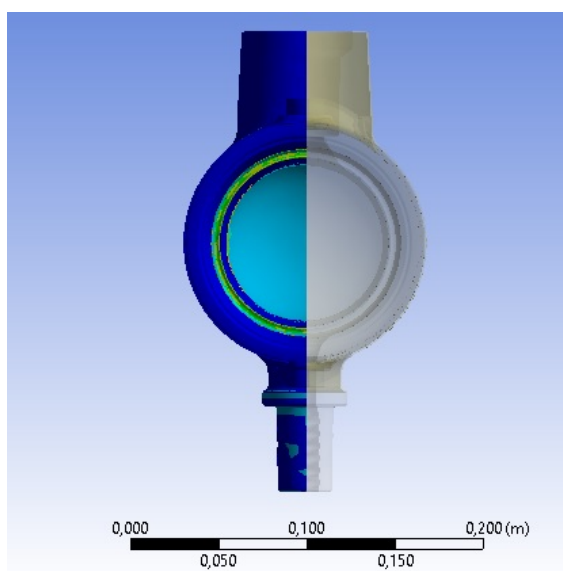


Figura 6.1: Corte do tubo segundo um plano no seu centro

Numa primeira fase, é apresentado o cenário atualmente utilizado na cela FLUOFIX GC. Em seguida, são simulados novos cenários com pequenas alterações no modelo procedendo-se a uma comparação dos resultados obtidos com os resultados do cenário original averiguando se

algum dos novos casos estudados pode servir, ou não, como uma alternativa válida. Os resultados apresentados dizem respeito aos cenários descritos anteriormente no capítulo 5.

6.1 Cenário 1

O primeiro cenário a ser simulado corresponde ao tubo porta fusível original sem estar sujeito a nenhuma alteração. No exterior do tubo está também representado o ponto de ligação à massa através da película fina de zinco e dos componentes em latão.

A figura 6.2 permite observar, através do corte do modelo referido anteriormente, o interior do componente de resina epóxi e os campos elétricos provocados pela aplicação da devida tensão nos terminais no seu interior.

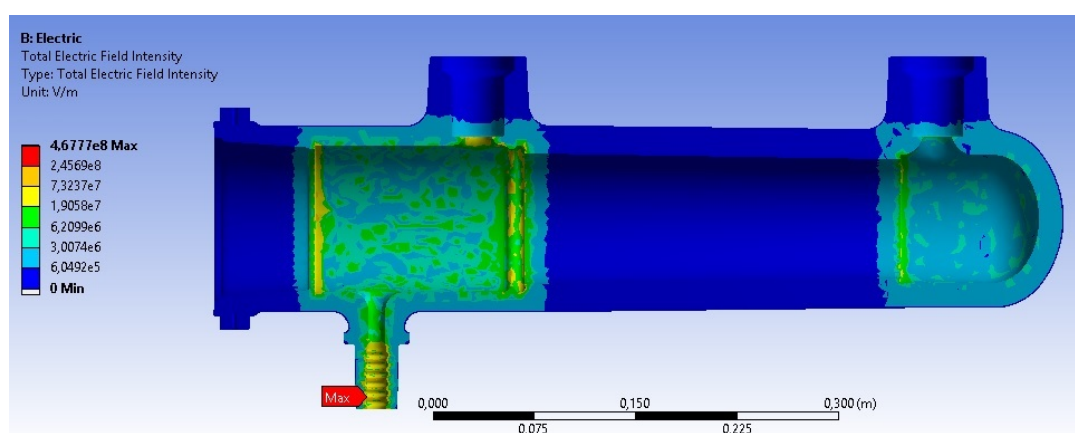


Figura 6.2: Intensidade de campos elétricos no tubo porta fusível

Olhando para a figura é possível observar diversos campos elétricos a surgir nas zonas onde se encontram os terminais no interior do tubo, principalmente nas zonas de fronteira entre estes e a resina. Os campos elétricos apresentam-se dispostos em diferentes níveis de intensidade de campo elétrico visíveis na legenda que acompanha a figura. O primeiro aspeto essencial passa por verificar se a rigidez dielétrica do isolamento é ultrapassada ou não.

Na secção 5.2.6 desta Dissertação é dito que a rigidez dielétrica de um componente feito à base de resina epóxi situa-se nos 19,7 kV/mm. Na legenda da figura 6.2 o valor $1,9058 \times 10^7$ V/m, que convertendo é equivalente a ter 19,058 kV/mm, representa um valor aproximado da rigidez dielétrica da resina epóxi. Assim, e de acordo com a legenda, os campos elétricos representados pelas cores amarelo, laranja e vermelho correspondem a campos elétricos acima do valor de rigidez dielétrica do isolador, o que por si só permite concluir que nessas zonas poderão ser originadas DP. A ocorrência destas DP provoca a deterioração progressiva do dielétrico e pode levar à perfuração do mesmo.

O máximo valor calculado de intensidade de campo elétrico ocorre na zona correspondente ao terminal frontal do tubo, mais especificamente na extremidade ondulada. Adicionalmente, neste mesmo terminal, existem diversos pontos onde a intensidade de campo elétrico se encontra em

níveis de intensidade acima da rigidez dielétrica do material. Todos esses pontos ocorrem nas zonas de fronteira entre o terminal e a resina deixando a ideia de que uma atuação no molde do terminal nessas zonas pode ser uma opção e que uma alteração pode ser estudada com vista a baixar os níveis de intensidade de campo elétrico.

Também nos topos do tubo porta fusível existem alguns campos elétricos em níveis de intensidade não desejáveis. A figura 6.3 mostra uma visão do topo do tubo porta fusível onde se podem ver os locais onde se situam os terminais e onde é feita a ligação quando este é aplicado na cela.

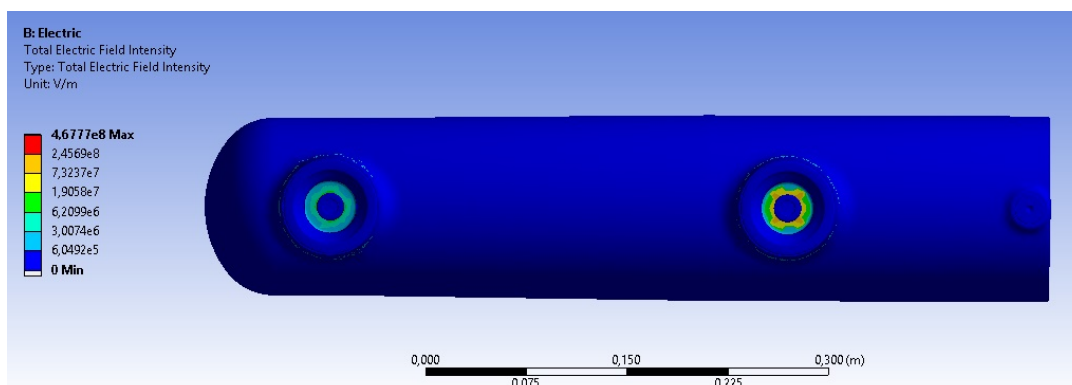


Figura 6.3: Intensidade de campos elétricos nos topos do tubo porta fusível

Através da figura é possível perceber que apenas o topo que faz a ligação ao terminal frontal do tubo apresenta níveis alarmantes de intensidade de campo elétrico. Atualmente são utilizados nos tubos porta fusíveis copos de silicoes com o mesmo formato e que são colocados no topo. Esse componente não se encontra representado no modelo caso contrário poderia ser uma ajuda fundamental para suportar a intensidade de campo elétrico neste local.

6.2 Cenário 2

Neste segundo cenário não é feita nenhuma alteração ao nível do tubo, apenas são introduzidas a ferramenta de ensaio e a vareta, tal como o descrito na secção 5.3.2. O objetivo passa por verificar se a inclusão destes dois componentes apenas utilizados nos ensaios laboratoriais afetam significativamente os resultados obtidos.

A figura 6.4 apresenta o resultado do cálculo da intensidade de campos elétricos no interior do tubo. Na figura não estão visíveis os dois novos componentes que, assim como os terminais no interior do tubo, foram escondidos para permitir uma melhor visualização dos resultados.

Comparando este caso com o Cenário 1, a primeira observação a fazer é que o valor máximo calculado de intensidade de campo elétrico não se encontra exatamente no mesmo local. No entanto ambos dizem respeito à zona ondulada onde é encaixada a vareta. De uma maneira geral, este local apresenta intensidades de campo elétrico ligeiramente mais elevadas que o caso original. Tanto num caso como no outro, neste local os níveis de intensidade de campo elétrico ultrapassam

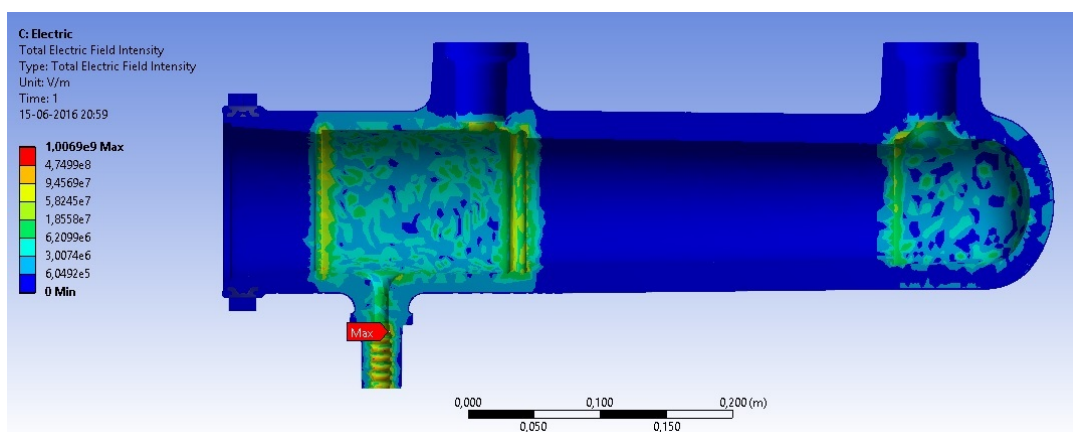


Figura 6.4: Intensidade de campos elétricos no tubo porta fusível após inclusão das ferramentas de ensaio

a rigidez dielétrica do material, podendo ser considerada uma área interessante onde atuar posteriormente. Observando o restante terminal frontal, verifica-se que o seu comportamento é algo semelhante ao do Cenário 1, ao nível dos pontos onde a intensidade de campo elétrico ultrapassa a rigidez dielétrica da resina.

Quanto à zona do fundo do tubo onde se situa o outro terminal é possível observar que, com a inclusão da ferramenta utilizada nos ensaios, o comportamento dielétrico é também similar ao caso do Cenário 1.

É necessário proceder também a uma comparação dos topos do tubo para as duas situações. A figura 6.5 mostra uma visão do topo do tubo porta fusível onde se podem ver os locais onde se situam os terminais e onde é feita a ligação quando este é aplicado na cela.

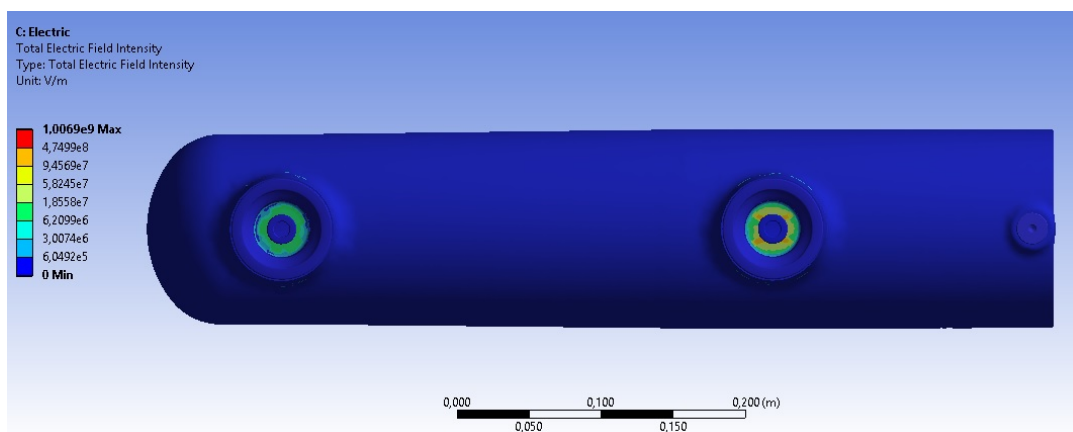


Figura 6.5: Intensidade de campos elétricos nos topos do tubo porta fusível após inclusão das ferramentas de ensaio

No que diz respeito aos topos do tubo, comparando com o Cenário 1, este apresenta um comportamento muito parecido no topo que faz a ligação ao seu terminal frontal. Quanto ao topo

que faz a ligação ao terminal do fundo do tubo apresenta um pequeno aumento na intensidade de campo elétrico não sendo porém para níveis acima da rigidez dielétrica da resina.

Em jeito de conclusão, comparando os resultados obtidos com os resultados do Cenário 1, é possível afirmar que a inclusão da ferramenta de ensaio e da vareta no modelo não têm uma influência significativa no cálculo da intensidade de campos elétricos no tubo porta fusível. Apesar de alguns valores de intensidade não coincidirem na totalidade, ao aplicar estes dois novos componentes ao modelo não surgem novas zonas em que a rigidez dielétrica da resina é ultrapassada.

6.3 Cenário 3

Este cenário corresponde à introdução de uma pequena alteração na morfologia do terminal frontal do tubo, numa das extremidades. Sendo esta uma zona problemática nos dois cenários apresentados anteriormente, a intenção é tentar melhorar o comportamento do dielétrico neste local quando exposto a tensão.

A figura 6.6 permite observar os resultados obtidos para o cálculo da intensidade de campo elétrico no interior do tubo porta fusível após a aplicação da referida alteração num dos terminais.

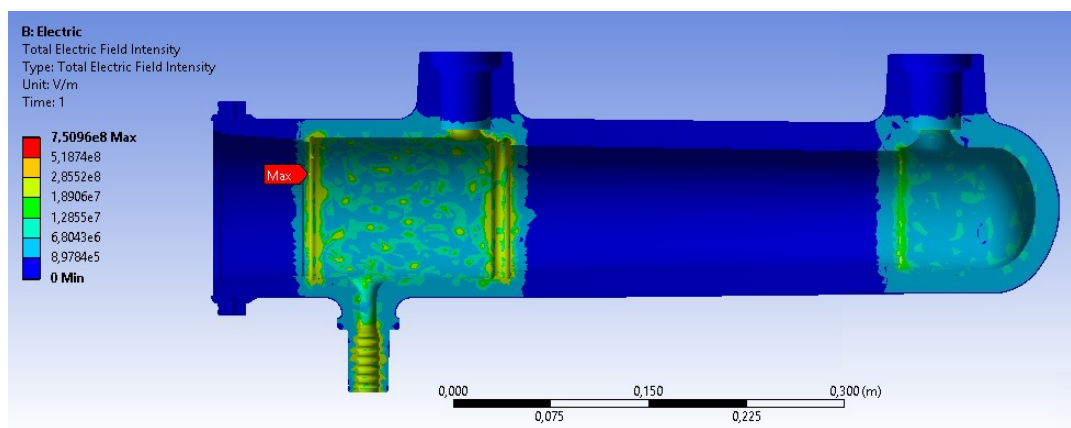


Figura 6.6: Intensidade de campos elétricos no tubo porta fusível após introdução de alteração no terminal frontal

Olhando para a figura, fica claro que esta opção não é nada favorável no que diz respeito à intensidade de campo elétrico presente no tubo. Relativamente ao caso original, apresentado no Cenário 1, existem mais zonas onde a rigidez dielétrica da resina é ultrapassada.

Quanto ao terminal frontal do tubo o comportamento dielétrico verificado não apresenta melhorias em relação ao caso original, sendo no local onde se introduziu a alteração que surge o novo valor máximo de intensidade de campo elétrico. Ambas as extremidades da resina que estão em contacto com o terminal apresentam zonas alargadas em que a sua rigidez dielétrica é ultrapassada.

A zona onde se encontra o terminal do fundo do tubo apresenta um comportamento muito semelhante em relação ao caso original, o que é compreensível dado que não foi introduzida nenhuma alteração na geometria do modelo neste local.

Finalmente, procedeu-se a uma observação dos topos do tubo porta fusível. A figura 6.7 mostra uma visão do topo do tubo porta fusível onde se podem verificar os acessos aos seus terminais.

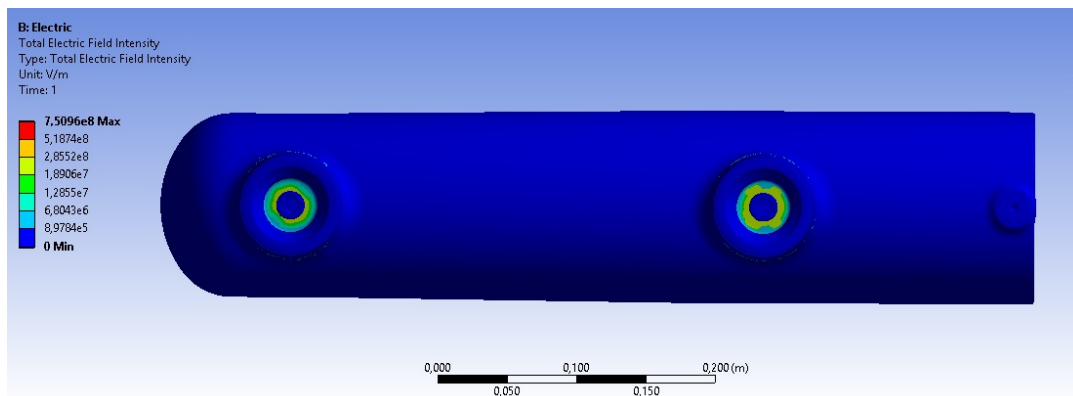


Figura 6.7: Intensidade de campos elétricos nos topos do tubo porta fusível após introdução de alteração no terminal frontal

Tendo em conta a figura, verifica-se que existe uma ligeira atenuação na intensidade de campo elétrico no topo que corresponde ao terminal frontal, continuando ainda assim acima da rigidez dielétrica da resina. O topo que corresponde ao terminal do fundo do tubo continua a não representar um problema.

Concluindo, ao comparar este cenário com o caso do Cenário 1, é possível afirmar que a alteração introduzida na extremidade do terminal frontal do tubo não é benéfica para a performance dielétrica do tubo porta fusível.

6.4 Cenário 4

No quarto cenário a ser simulado é também aplicada uma alteração na morfologia do modelo sendo que, ao invés do Cenário 3, neste caso a alteração é feita no formato da resina do tubo. Assim, neste caso, é introduzido um aumento na espessura da camada de resina epóxi mas apenas numa direção vertical, resultando num tubo com um formato ligeiramente ovalizado.

A figura 6.8 permite observar os resultados obtidos no cálculo da intensidade de campo elétrico no interior do tubo porta fusível após o aumento da espessura da camada de resina do tubo.

Numa primeira observação da figura, é possível afirmar que de uma maneira geral o comportamento apresentado pelo modelo do Cenário 4 apresenta melhorias em relação ao Cenário 1, o caso original do tubo porta fusível.

Olhando para o fundo do tubo, verifica-se que este local apresenta um comportamento dielétrico satisfatório, à imagem do caso original apresentado no Cenário 1. À partida continuarão a não existir fenómenos de disrupção neste local.

No que diz respeito ao local onde se encontra o terminal frontal do tubo, existe também uma diminuição dos níveis de intensidade de campo elétrico e da extensão das zonas de disrupção

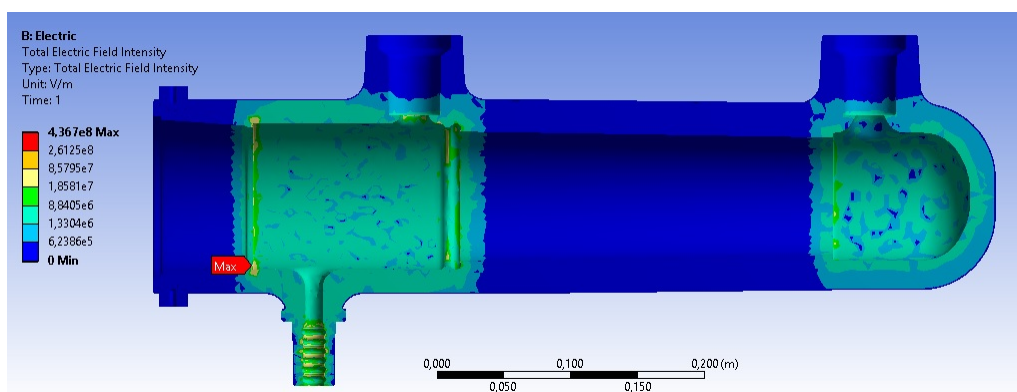


Figura 6.8: Intensidade de campos elétricos no tubo porta fusível após aumento de espessura da camada de resina

do dielétrico. Apesar de haver essa diminuição, as extremidades da resina em contacto com o terminal e a zona ondulada onde é encaixada a vareta em ensaios laboratoriais apresentam ainda alguns pontos onde é ultrapassada a sua rigidez dielétrica. O valor máximo de intensidade de campo elétrico ocorre na extremidade esquerda da resina que está em contacto com o terminal pelo que introduzir uma alteração neste terminal poderia ser uma opção a estudar, à imagem do teste feito anteriormente no Cenário 3. Também na zona ondulada na parte inferior do tubo existem alguns pontos críticos pelo que também a introdução de uma alteração no formato deste local do terminal poderá ser uma hipótese interessante.

Em seguida, surge a observação dos topos do tubo porta fusível após o aumento de espessura da camada de resina. A figura 6.9 mostra uma visão do topo do tubo porta fusível onde é possível observar os acessos aos seus terminais.

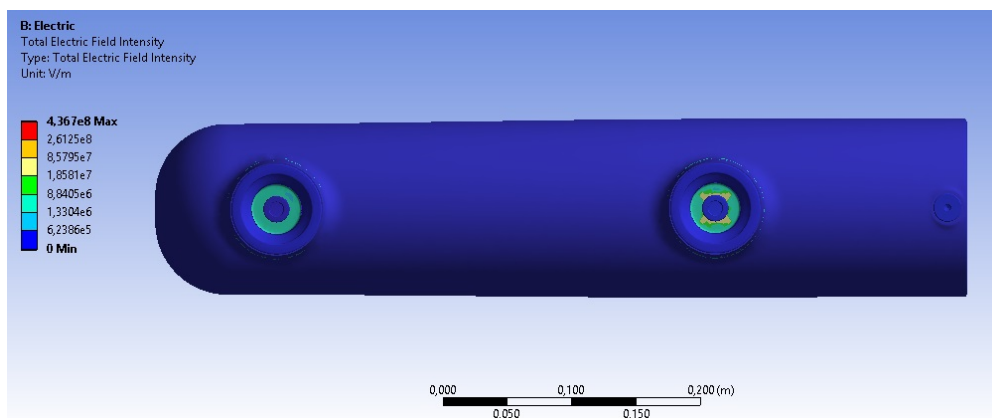


Figura 6.9: Intensidade de campos elétricos nos topos do tubo porta fusível após aumento de espessura da camada de resina

Olhando para a figura 6.9 e estabelecendo uma comparação com a figura 6.2, correspondente ao Cenário 1, é possível verificar que existe um decréscimo da intensidade de campo elétrico

no topo correspondente ao terminal frontal. Ainda assim, esta encontra-se ligeiramente acima da rigidez dielétrica. O topo que corresponde ao terminal do fundo do tubo continua a não representar um problema.

Concluindo, ao comparar este caso com o caso do Cenário 1, o aumento da espessura da camada de resina tem uma influência positiva na performance dielétrica do tubo porta fusível. Apesar de não garantir um comportamento que elimine todos os campos elétricos acima da rigidez dielétrica da resina, apresenta um desempenho mais satisfatório que o caso do Cenário 1.

6.5 Cenário 5

Neste quinto cenário, a alteração introduzida no modelo está na eliminação das ondulações da parte inferior do terminal frontal do tubo, como visto anteriormente na figura 5.8.

A figura 6.10 permite observar os resultados obtidos no cálculo da intensidade de campo elétrico no interior do tubo porta fusível após a alteração introduzida no terminal frontal do tubo.

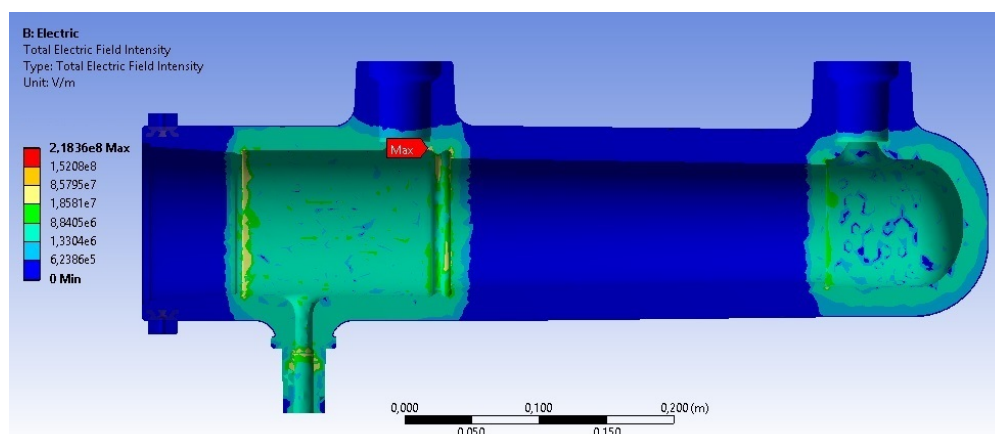


Figura 6.10: Intensidade de campos elétricos no tubo porta fusível após eliminação de ondulações no terminal frontal

Olhando em primeiro lugar para o fundo do tubo, verifica-se que este local apresenta um comportamento dielétrico satisfatório, tal como o caso do Cenário 4. Assim, à partida, esta zona continuará a ser uma zona onde não ocorre a disrupção do dielétrico.

Quanto ao local onde se encontra o terminal frontal, é aqui que se encontra o novo máximo de intensidade de campo elétrico. Comparando com o caso do Cenário 4 verifica-se que, com a alteração introduzida neste caso, esse valor máximo é mais baixo e que se encontra num local diferente. Observando o local onde são retiradas as ondulações, é fácil de notar que os pontos onde a rigidez dielétrica é ultrapassada existem em menor quantidade quando comparado com o cenário anterior. Já quanto ao local da resina que se encontra na fronteira com o lado esquerdo do terminal, apresenta uma área mais extensa onde poderá ocorrer a disrupção do dielétrico quando comparado com o modelo do Cenário 4.

Posteriormente, são observados os topos do tubo porta fusível após a eliminação das ondulações no terminal frontal do tubo. A figura 6.11 mostra uma visão do topo do tubo porta fusível onde é possível observar os acessos aos seus terminais.

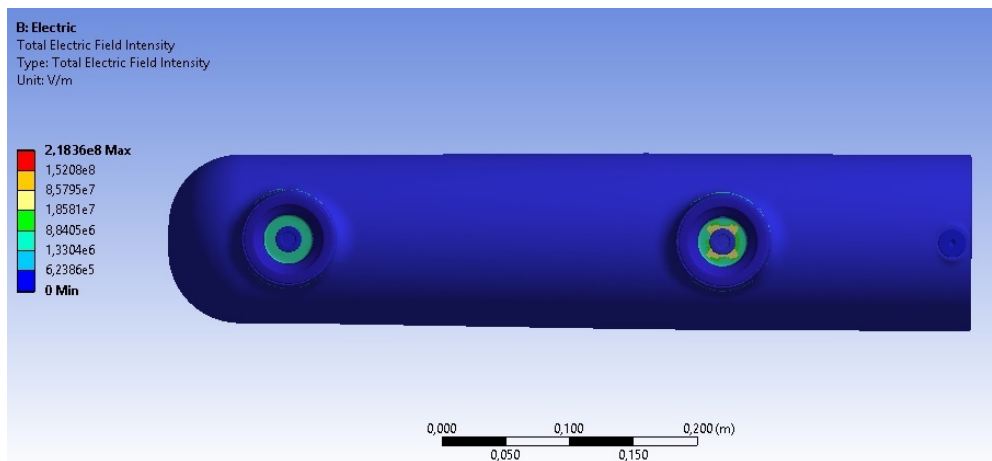


Figura 6.11: Intensidade de campos elétricos nos topos do tubo porta fusível após eliminação de ondulações no terminal frontal

Olhando para a figura 6.11, verifica-se que o comportamento do tubo nos topos que dão acesso aos terminais é muito semelhante ao do Cenário 4. Assim sendo, apenas o topo correspondente ao terminal frontal apresenta uma intensidade de campo elétrico ligeiramente superior à rigidez dielétrica da resina. Ainda assim, este caso representa uma melhoria relativa ao caso original, apresentado no Cenário 1. Quanto ao topo que corresponde ao terminal do fundo do tubo, como o habitual, continua a não representar um problema ao nível das DPs.

Comparando este caso com o caso do tubo porta fusível original, este caso apresenta-se como uma melhor solução para o tubo porta fusível no que à performance dielétrica diz respeito. Em relação ao Cenário 4, este cenário apresenta algumas diferenças. Apesar da zona onde se interveio apresentar uma melhoria e o valor máximo de campo elétrico baixar, o local da resina que se encontra na fronteira com o lado esquerdo do terminal, apresenta uma área mais extensa onde poderá ocorrer a disrupção do dielétrico. Ambos os casos seriam hipóteses a considerar e apenas alguns ensaios laboratoriais poderiam tirar todas as dúvidas.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalho Futuro

Neste capítulo procuram apresentar-se, numa primeira fase, as principais conclusões obtidas após o desenvolvimento da presente Dissertação. Em seguida, serão analisados fatores como a satisfação dos objetivos inicialmente propostos e como as dificuldades encontradas ao longo do trabalho. Finalmente, são apresentadas algumas propostas de trabalhos futuros que possam ser interessantes para complementar a presente Dissertação.

7.1 Principais conclusões

A presente Dissertação teve o objetivo de atingir a performance dielétrica máxima no equipamento de Distribuição Secundária de MT, FLUOFIX GC, de 24kV com 3 funções, 2IS+1CIS, nomeadamente no componente mais crítico em resina epóxi, o porta fusível. A ocorrência de DPs no tubo porta fusível levaram à realização de um estudo centrado neste componente com o intuito de eliminar esses fenómenos. Assim, foram estudadas diversas possibilidades de alterações que poderão vir a ser aplicadas na morfologia do tubo porta fusível.

Em primeiro lugar, foi estudado o formato atual do tubo porta fusível. Como era de esperar, a simulação com a morfologia original do tubo revelou diversos pontos onde ocorrem níveis de intensidade de campo elétrico acima da rigidez dielétrica. Tal acontecimento já era esperado dado que este foi o principal fator que levou à realização deste trabalho. Ainda referente a esta morfologia, foi estudada a possibilidade de a introdução de componentes utilizados durante os ensaios laboratoriais ter influência significativa nos níveis de DPs medidos. São estes instrumentos, uma vareta e uma ferramenta que faz a ligação entre os dois terminais no interior do tubo. Esse estudo permitiu verificar que a introdução desses dois componentes no modelo não tem uma influência significativa no cálculo da intensidade de campos elétricos no tubo porta fusível. Apesar de alguns valores de intensidade não coincidirem na totalidade, ao aplicar estes dois novos componentes ao modelo não surgem novas zonas em que a rigidez dielétrica da resina é ultrapassada.

Em seguida, foi testado um modelo com uma ligeira alteração na fronteira do terminal frontal do tubo. Esta alteração justifica-se pelo facto de no modelo do tubo original esta ser uma zona muito problemática. Os resultados que provieram da simulação do caso correspondente a esta

alteração não revelaram dados muito favoráveis à performance dielétrica do tubo porta fusível pelo que, considerando esses resultados, a dita alteração não será uma hipótese a ser considerada.

O modelo seguinte a ser testado correspondeu a um aumento da espessura do material isolante do tubo, a resina epóxi. A simulação correspondente a este modelo revelaram resultados algo satisfatórios na medida em que representam uma melhoria em relação ao tubo original. Apesar de ainda ser possível visualizar alguns pontos problemáticos, estes ocorrem em menor quantidade pelo que esta solução poderá vir a ser uma hipótese a considerar sendo necessário validar esta simulação com, por exemplo, ensaios em laboratórios de alta tensão.

O último modelo testado correspondia à introdução de uma alteração numa zona problemática em todos os modelos testados anteriormente. Partindo do último modelo, com o tubo com uma espessura da camada de resina um pouco maior, foram eliminadas as ondulações na zona do terminal onde é encaixada a vareta nos ensaios laboratoriais. Esta zona, após a alteração, passou a apresentar uma superfície lisa. No local onde são retiradas as ondulações, verificou-se que a quantidade de pontos onde a rigidez dielétrica é ultrapassada é menor quando comparado com o último modelo simulado anteriormente. No entanto, no local da resina que se encontra na fronteira com o lado esquerdo do terminal, apresenta uma área mais extensa onde poderá ocorrer a disrupção do dielétrico. Comparando este caso com o caso do tubo porta fusível original, este caso apresenta-se também como uma melhor solução para o tubo porta fusível no que à performance dielétrica diz respeito.

7.2 Satisfação dos Objectivos e Principais dificuldades encontradas

O objetivo principal desta Dissertação passava por atingir a performance dielétrica máxima do componente tubo porta fusível. Tal objetivo não foi atingido visto que nenhum dos cenários apresentados apresenta um comportamento completamente satisfatório ao nível da intensidade de campos elétricos. No entanto, existem casos que podem promover uma melhoria na performance dielétrica do tubo porta fusível.

Durante o desenvolvimento deste trabalho surgiram diversas dificuldades. A falta de bases e a inexperiência em trabalhos de modelação 3D atrasaram um pouco o desenvolvimento do trabalho. A certa altura, foi com a ajuda do projetista da Efacec Rui Marinho que se ultrapassaram estas dificuldades. Também o desconhecimento da ferramenta *Ansys* e o facto de na Efacec não se trabalhar com este *software* específico constituiu uma dificuldade que, apesar de ser uma ferramenta poderosa, é também muito complexa e leva algum tempo até ser dominada. Ainda no que diz respeito ao *Ansys*, a utilização de uma licença académica disponibilizada pela FEUP, impõe certos limites no número de elementos finitos a utilizar para o cálculo das soluções. Assim, o facto de não poder exceder um certo número de elementos finitos constitui não só uma dificuldade mas também um impedimento, dado que este facto pode comprometer a veracidade dos resultados obtidos.

7.3 Trabalhos Futuros

A realização desta Dissertação deixou em aberto algumas possibilidades de melhoria que em projetos futuros poderão ser estudadas e exploradas. Nesta secção são apresentadas, de forma resumida, algumas ideias que podem ser tidas em conta tendo como ponto de partida o trabalho realizado.

7.3.1 Determinação com precisão de valores de resistividade elétrica dos materiais

Uma das primeiras tarefas a desenvolver no início da presente Dissertação foi a construção de uma biblioteca com informação relativa aos materiais utilizados num tubo porta fusível, mais especificamente informação relativa à resistividade elétrica de cada um deles. Tal informação para a construção da biblioteca foi reunida através de uma pesquisa entre *websites*, artigos, entre outros, o que pode induzir em alguns erros. Se a informação relativa a materiais como o alumínio ou o cobre são comuns e relativamente fáceis de encontrar, o mesmo não acontece com a resina epóxi, onde existe alguma discrepância nos valores encontrados.

Um possível trabalho futuro poderia passar por proceder a análises químicas aos materiais utilizados, principalmente à resina epóxi utilizada. Isto permitiria obter valores de resistividade elétrica e de rigidez dielétrica mais fiáveis e mais aproximados da realidade. Assim, no final, seria interessante proceder à realização de novas simulações e fazer uma comparação de resultados com os resultados obtidos nesta Dissertação.

7.3.2 Estudo de morfologias adicionais para o modelo do tubo porta fusível

Ao longo desta Dissertação foram testadas diferentes morfologias para o modelo do tubo porta fusível. No entanto, existe ainda muito por explorar neste campo. Como já foi escrito na secção 7.1, a performance dielétrica máxima do tubo porta fusível não foi atingida pelo que novas modificações podem ser estudadas de forma a complementar as simulações já realizadas. Seria também interessante começar a incluir progressivamente nas simulações novos componentes que fazem parte da constituição da cela FLUOFIX GC.

7.3.3 Implementação de ensaios de Descargas Parciais

Qualquer software apresenta sempre um erro associado, ainda que possa ser muito pequeno. Esse erro, conjuntamente com a alguma incerteza nos valores definidos na construção de biblioteca de materiais, podem levar a alguns erros que nas simulações não são detetados. Assim sendo, a melhor forma de validar as simulações realizadas seria a implementação de ensaios de DPs de forma a comprovar, ou não, os resultados obtidos nas simulações efetuadas no *Ansys*.

Referências

- [1] M. V. Bakshi, U. A.; Bakshi. *Protection and Switchgear*. 2009.
- [2] Colin Bayliss e Brian Hardy. *Transmission and Distribution Electrical Engineering*. Third edit edição, 2012.
- [3] Bharat Heavy Electricals Limited. *Handbook of Switchgears*. McGraw-Hill, 2007.
- [4] Jean Marc Biasse. What will MV switchgear look like in the future?, 2013.
- [5] Jonathan Trejo, José Garcia, e Héctor Carvajal. *Medición de descargas parciales en arreglos aislador - cable semiaislado*. Tese de doutoramento, Instituto Politécnico Nacional, 2014.
- [6] Direct Industry. URL: <http://www.directindustry.com/> [último acesso em 2016-04-10].
- [7] Guilherme Cunha da Silva. *DESCARGAS PARCIAIS ESTIMULADAS POR RAIOS-X CONTÍNUO E PULSADO EM MATERIAIS DIELÉTRICOS: SIMILARIDADES E DIFERENÇAS*. Tese de doutoramento, Universidade Federal do Paraná, 2005.
- [8] EFACEC Energia, Máquinas e Equipamentos Elétricos S.A. FLUOFIX - Celas modulares e compactas. URL: http://www.efacec.pt/presentationLayer/efacec_produto_01.aspx?idioma=1&idProduto=252 [último acesso em 2016-03-16].
- [9] EFACEC Energia, Máquinas e Equipamentos Elétricos S.A. Fluofix GC - Manual de Instruções.
- [10] EFACEC Energia, Máquinas e Equipamentos Elétricos S.A. Fluofix GC - Portefólio de Soluções.
- [11] ERSE. Regulamento de Qualidade de Serviço. URL: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/liberalizacaodosector/Paginas/default.aspx> [último acesso em 2016-03-02].
- [12] IDC. Switchgear in a Network Context. URL: http://www.idc-online.com/CB_CircuitBreakerAndSwitchgearChapterOne [último acesso em 2016-03-02].
- [13] Electrical4u. Electrical Switchgear Protection. URL: <http://www.electrical4u.com/electrical-switchgear-protection/> [último acesso em 2016-03-03].
- [14] Stan Stewart. *Distribution Switchgear*. 2004.
- [15] Electrical4u. Electrical Circuit Breaker: Operation and Types of Circuit Breaker. URL: <http://www.electrical4u.com/electrical-circuit-breaker-operation-and-types-of-circuit-breaker/> [último acesso em 2016-03-03].

- [16] Electrical4u. Arc in Circuit Breaker. URL: <http://www.electrical4u.com/what-is-arc-arc-in-circuit-breaker/> [último acesso em 2016-03-03].
- [17] SKM-Eleksys. Air Blast Circuit Breaker. URL: <http://www.skm-eleksys.com/2012/04/air-blast-circuit-breaker-abcb.html> [último acesso em 2016-03-04].
- [18] Menglei Zheng e Ji Hoon Ma ; Lyun Yu ; Seog Won Lee ; Young Geun Kim ; Yang Seob Sin ; Jong Heok Lee ; Sung Yon Won. Application of solid insulated materials on medium voltage switchgear of distribution lines. *CICED 2010 Proceedings*, 2010. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5736191>.
- [19] Emerson Electric. What is Partial Discharge Testing? URL: <http://www.emersonnetworkpower.com/en-US/Services/Market/Industrial/Equipment-Based-Services/Predictive-Diagnostics/Pages/what-is-partial-discharge-testing.aspx> [último acesso em 04-04-2016].
- [20] EA Technology. The PD Academy. URL: <http://www.partial-discharge-academy.com> [último acesso em 05-04-2016].
- [21] Dieter; König e Y. Narayana Rao. *Partial Discharges in Electrical Power Apparatus*. VDE-Verlag, 1993.
- [22] José Teixeira Junior. MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS.
- [23] IEC. IEC 62271-200 (2011-10) - AC metal-enclosed switchgear and controlgear 1 kV to 52 kV, 2011.
- [24] SILAEX. Epóxi. URL: <http://www.silaex.com.br/resinas%20ep%C3%B3xi.htm> [último acesso em 2016-03-30].
- [25] C. Pitt, B. Barth, e B. Godard. Electrical Properties of Epoxy Resins. *IRE Transactions on Component Parts*, página 4, 2003. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1135915>.
- [26] Engineering Toolbox. Resistivity, Conductivity and Temperature Coefficients for Common Materials. URL: http://www.engineeringtoolbox.com/resistivity-conductivity-d_418.html [último acesso em 2016-04-19].
- [27] Engineering Toolbox. Resistance and Resistivity. URL: http://www.engineeringtoolbox.com/resistance-resisitivity-d_1382.html [último acesso em 2016-04-19].
- [28] Y. X. Zhou, P. X. Wu, Z. Y. Cheng, J. Ingram, e S. Jeelani. Improvement in electrical, thermal and mechanical properties of epoxy by filling carbon nanotube. *Express Polymer Letters*, 2(1):40–48, 2008.
- [29] L. I. Berger. DIELECTRIC STRENGTH OF INSULATING MATERIALS. URL: http://chemistry.mdma.ch/hiveboard/rhodium/pdf/chemical-data/diel_strength.pdf [último acesso em 2016-04-20].